



ISSN 2651-0669 (Print)

ISSN 2822-1206 (Online)

DTAJ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

Defence Technology Academic Journal

Volume 8 Issue 17 / January - June 2026

บทความวิชาการ (Academic Articles)

- แนวทางการกำกับดูแล AI ในกิจการโทรคมนาคมภายใต้บทบาท ของ กสทช.
- การพัฒนาแบบจำลองการประมาณระยะเวลาการบินของโดรนปีกหมุนแบบหลายใบพัด โดยใช้ข้อมูลคุณลักษณะทั่วไปของระบบขับเคลื่อนและแบตเตอรี่

บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Article)

- การวัดเทียบศักยภาพด้านการรบและอุตสาหกรรม: กรณีศึกษาโครงการพัฒนาจรวดภายในประเทศ ของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

บทความวิจัย (Research Articles)

- การประเมินป่าในเมืองด้วยการรับรู้ระยะไกลผ่านเทคโนโลยีอวกาศ: มวลชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอน
- การวิเคราะห์ความแข็งแรงของสะพานโลหะสำหรับรถสะพานเครื่องหนุนมันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- การศึกษาผลของอายุการเก็บรักษาไลน์เนอร์ก่อนการหล่อดินขับที่มีต่อการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุทั้งสอง
- การเปรียบเทียบชิปนวัตริภายในอาวุธปืนขนาด 5.56 มม. ที่ใช้ดินปืนแบบทรงกระบอกและทรงกลม
- การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการตรวจจับฉนวนไฟฟ้าด้วยโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับหุ่นยนต์ทำความสะอาดฉนวน ผ่าน MQTT โดยประมวลผลบน CPU
- การพัฒนาระบบ Web Application Firewall (WAF)อัจฉริยะที่ใช้ Machine Learning ในการตรวจจับและป้องกันการโจมตี

คำแนะนำในการส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์ ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (DTAJ)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศเป็นวารสารของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ สำหรับการบริหารจัดการส่งเสริม
แบ่งปัน และแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ในรูปแบบบทความวิจัย บทความวิชาการ และบทวิเคราะห์จากการศึกษา ค้นคว้า วิจัยและพัฒนา
ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ ซึ่งจัดพิมพ์เป็นราย 6 เดือน

ผู้สนใจเขียนบทความเพื่อส่งเข้ามามีสิทธิ์ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศสามารถติดต่อขอข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่
โทร. 02 980 6688 ต่อ 2123 หรือ 2124 หรือ e-mail: admin-dtaj@dti.or.th



หลักเกณฑ์การพิจารณาก่อนรับบทความ

บทความที่จะได้รับการตีพิมพ์ต้องเป็นบทความ
ที่แสดงให้เห็นถึงคุณภาพทางวิชาการ และมีประโยชน์
ในเชิงทฤษฎีหรือเชิงปฏิบัติ โดยผ่านการพิจารณาและ
ให้ความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer review) ซึ่ง
ต้องมีคุณสมบัติอย่างต่ำตามเกณฑ์มาตรฐานคือ เป็น
ผู้เชี่ยวชาญในสาขานั้นๆ ทำงานวิจัยและมีผลงานวิจัย
อย่างต่อเนื่อง จำนวนอย่างน้อย 3 ท่านขึ้นไปบทความ
และ/หรือ ผ่านการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็น
รายกรณี



คำแนะนำในการส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์

■ บทความที่รับพิจารณาตีพิมพ์



บทความวิจัย

มีความยาวไม่เกิน 10 หน้ากระดาษ A4 พิมพ์ด้วย
Microsoft Word for Windows หรือไม่น้อยกว่า 2,500 คำ
โดยการใช้คำสั่ง Word count ใน MS Word เพื่อนับคำ (แต่ไม่เกิน
10 หน้ากระดาษ A4) ประกอบด้วย ชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน (Title)
สถานที่ทำงาน (Work place of author & co-authors) การติดต่อ
ผู้เขียน (Contact address of correspondence) บทคัดย่อ
(Abstract) และคำสำคัญ (Keywords ไม่เกิน 3-5 คำ) โดย
เนื้อหาดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษา
อังกฤษ ตามด้วยเนื้อเรื่อง กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) เอกสาร
อ้างอิง ภาคผนวก (ถ้ามี)

เนื้อเรื่องจะประกอบด้วย บทนำ (Introduction)
ขอบเขตการวิจัย/วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย/ทดลอง (Materials
and Methods) ผลการวิจัย/ทดลอง (Results) วิจารณ์อภิปราย
ผล (Discussion) บทสรุป (Conclusions) กิตติกรรมประกาศ
(Acknowledgement ถ้ามี) เอกสารอ้างอิง (References)

บทความวิชาการ

บทความวิชาการต้องประกอบด้วย ชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน
สถานที่ทำงาน วิธีการติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ (Abstract)
และคำสำคัญ (Keywords ไม่เกิน 5 คำ) ทั้งภาษาไทยและ
ภาษาอังกฤษ ตามด้วยเนื้อเรื่อง ซึ่งลักษณะองค์ประกอบของ
เนื้อเรื่องอาจจะคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของ
วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง ผลการวิจัยหรือผลการทดลอง
เป็นต้น

รายชื่อผู้จัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

คณะที่ปรึกษา

พลเอก ดร.ชรัติ อุ่มสัมฤทธิ์
พลตรี พีรพงศ์ โพธิ์เหมือน
พันเอก จิรศักดิ์ จิวไม้แดง
พันเอก ดร.อำพันธ์ จันทร์เพ็งเพ็ญ
พันเอก ดร.ชัชพงษ์ พันธุ์พยัคฆ์

บรรณาธิการ

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์ บุรีรัตน์
ศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา ธารีบุญ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ จิรวิภากร
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เหล่าสุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ กฤษเจริญ

มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี

ฝ่ายจัดการ

นางสาวอินทิรา จุลชาติ
นางสาวบุญญาภรณ์ วาณิชชาติ
นางสาวสาวิตรี ระงับพิษ
ว่าที่ร้อยตรีหญิง ดร.ลำยอง แสนทวี
นางสาวธนิสตา ประภาสिति

สารบัญ
วารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
ปีที่ 8 ฉบับที่ 17 มกราคม - มิถุนายน 2569

บทความวิชาการ (Academic Articles)

- แนวทางการกำกับดูแล AI ในกิจการโทรคมนาคมภายใต้บทบาท ของ กสทช.A1 - A18
ทิพนธ์ฐา กังวาลไกรไพศาล
- การพัฒนาแบบจำลองการประมาณระยะเวลาการบินของโดรนปีกหมุนแบบหลายใบพัดA19 - A32
โดยใช้ข้อมูลคุณลักษณะทั่วไปของระบบขับเคลื่อนและแบตเตอรี่
พิมพ์ชนก ภักดีคง และ ธนันต์ ยมจินดา

บทความวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ (Defence Analysis Article)

- การวัดเทียบศักยภาพด้านการรบและอุตสาหกรรม:D1 - D14
กรณีศึกษาโครงการพัฒนาจรวดภายในประเทศของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้
บดินทร์ สันทัต

บทความวิจัย (Research Articles)

- การประเมินป่าในเมืองด้วยการรับรู้ระยะไกลผ่านเทคโนโลยีอวกาศ:R1 - R16
มวลชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอน
ชนกฤต พิษขุนทด อีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ ญาณวุฒิ อุตรักษ์ สาธิต แสงประดิษฐ์
ธนเดช โรจนกุลศุล วุฒิศักดิ์ บุญแน่น และ งามอาจ ญาตินิยม
- การวิเคราะห์ความแข็งแรงของสะพานโลหะสำหรับรถสะพานเครื่องหนูนั่นR17 - R26
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
อชิรกฤษฎ์ จุลนิพิฐวงษ์ วรณชพัฒน์ ฤทธิเลื่อน อรรถพล เจริญผล และ ชานนทร์ เล็กอ่ำรัง
- การศึกษาผลของอายุการเก็บรักษาไลน์เนอร์ก่อนการหล่อดินขับR27 - R40
ที่มีต่อการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุทั้งสอง
ไพศาล อภินิหารพัฒน์ และ สุชีชัย นวลคล้าย
- การเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีภายในอาวุธปืนขนาด 5.56 มม.R41 - R50
ที่ใช้ดินปืนแบบทรงกระบอกและทรงกลม
สุรสิทธิ์ ปาลสาร
- การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการตรวจนับฉนวนไฟฟ้าด้วยโครงข่ายประสาทเทียมR51 - R60
สำหรับหุ่นยนต์ทำความสะอาดฉนวนผ่าน MQTT โดยประมวลผลบน CPU
ผกามาต วงศ์สาย วรารักษ์ เลื่องลือวุฒิ พันศักดิ์ เทียนวิบูลย์ กิตติการ วิริยะศาสตร์
อุบล ธงสถาพรวัฒนา ชนาธิป ชื่นมนัส และ พันธุ์เทพ แก้วมงคล
- การพัฒนาระบบ Web Application Firewall (WAF)R61 - R72
อัจฉริยะที่ใช้ Machine Learning ในการตรวจจับและป้องกันการโจมตี
เผด็จ สวิพันธุ์ และ ทิภาพร คุภามิตร

บทบรรณาธิการ

งานวิจัยและพัฒนา ตลอดจนบทความทางวิชาการเป็นแรงขับเคลื่อนการพัฒนาบุคลากร โดยใช้เป็นเครื่องมือในการสร้างความรู้ใหม่ ส่งเสริมนวัตกรรม เทคโนโลยี อุตสาหกรรม และเป็นข้อมูลสำคัญในการกำหนดนโยบายไปสู่ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นของสังคม ซึ่งท้ายที่สุดแล้วจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันของบุคลากร อีกทั้งการวิจัยยังสร้างเครื่องมือที่ดีขึ้นโดยตรงและเพิ่มจำนวนแรงงานที่มีทักษะ ในขณะที่งานวิชาการเป็นฐานข้อมูลเชิงประจักษ์สำหรับนโยบายที่สร้างทุนมนุษย์และความสามารถในการแข่งขัน ซึ่งจะนำพาสังคมไปข้างหน้า การวิจัยและพัฒนาช่วยส่งเสริมการพัฒนาของมนุษย์ได้ โดยเป็นแรงขับเคลื่อนการปฏิบัติทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียกระดับศักยภาพโดยรวมด้วยการขับเคลื่อนของสังคม

การเติบโตทางเศรษฐกิจและรายได้ นำไปสู่รายได้ส่วนบุคคลที่สูงขึ้น และมีมาตรฐานการครองชีพที่ดีขึ้น ส่วนบทความวิชาการช่วยส่งเสริมการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ผ่านการนำเสนอหลักฐานเชิงประจักษ์ ทฤษฎี และแบบจำลอง ซึ่งช่วยให้เข้าใจปัญหาต่าง ๆ ได้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการดำเนินการ นำเสนอข้อมูลเชิงลึกสำหรับผู้กำหนดนโยบายโดยแสดงให้เห็นว่าการวิจัยและพัฒนา การศึกษา และความมั่นคงทางสังคมส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของดัชนีการพัฒนารายบุคคล จะเห็นว่าความเชื่อมโยงของการวิจัยและพัฒนาและการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการสามารถเป็นดัชนีชี้วัดการขับเคลื่อนการพัฒนามนุษย์ เนื่องจากการวิจัยและพัฒนาเป็นการสร้างความรู้และนวัตกรรมใหม่ ๆ โดยบทความทางวิชาการเป็นกรอบความคิดและหลักฐานเชิงประจักษ์ ที่งานวิจัยและพัฒนาการพัฒนากับพัฒนาบุคลากรทำงานร่วมกันนำไปสู่การเสริมสร้างสังคมที่แข็งแกร่ง มีศักยภาพ และแข่งขันในระดับนานาชาติได้

นาวาอากาศเอก ดร.ชำนาญ ชุมทรัพย์

บรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

แนวทางการกำกับดูแล AI ในกิจการโทรคมนาคมภายใต้บทบาท ของ กสทช.

ทิพนัฏฐา กังวาลไกรไพศาล^{1*}

วันที่รับ 4 กุมภาพันธ์ 2569 วันที่แก้ไข 2 มิถุนายน 2569 วันที่ตอบรับ 11 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

ปัญญาประดิษฐ์ (AI) กำลังกลายเป็นเครื่องมือสำคัญที่เข้ามามีบทบาทและแทรกแซงในหลากหลายภาคส่วนทั่วโลก ไม่ว่าจะเป็นในแวดวงอุตสาหกรรมสื่อสารมวลชน อุตสาหกรรมโทรคมนาคม รวมไปถึงกำลังมีการนำ AI มาใช้ในด้านความมั่นคง โดยมาเปลี่ยนแปลงภูมิทัศน์ของการสงครามสมัยใหม่อย่างรวดเร็ว มีการใช้ AI ในกองทัพ ทำให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับการใช้งานที่เหมาะสมและความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น แต่ในอีกมุมหนึ่ง AI กลับเป็นส่วนหนึ่งที่มาแนะนำเสนอโอกาสสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและยกระดับคุณภาพชีวิตในประเทศไทย AI มีศักยภาพในการเสริมสร้างขีดความสามารถของมนุษย์และช่วยแก้ไขความท้าทายทางสังคมที่ซับซ้อน ประเทศไทยมีวิสัยทัศน์ที่จะก้าวสู่ระบบเศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนด้วย AI ภายในปี พ.ศ. 2570 อย่างไรก็ตาม การพัฒนาและการใช้งานระบบ AI ที่เติบโตอย่างรวดเร็วก่อให้เกิดความท้าทายที่สำคัญในด้านจริยธรรม ความโปร่งใส ความรับผิดชอบ ความเป็นส่วนตัวของข้อมูล และความปลอดภัยทางไซเบอร์ ความเสี่ยงเหล่านี้ครอบคลุมตั้งแต่การละเมิดสิทธิความเป็นส่วนตัวของข้อมูล อคติทางอัลกอริทึม (Algorithm Bias) ไปจนถึงการใช้งานในทางที่ผิด และผลกระทบต่อสิทธิมนุษยชน จึงเป็นความท้าทายต่อไปในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่จะคิดค้นแนวทางการกำกับดูแลการนำ AI มาใช้เพื่อเป็นผลลัพธ์ในเชิงบวกมากกว่าที่จะสร้างความเสียหายเพราะการควบคุมกำกับดูแลไม่ได้อย่างทันทั่วถึง

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์, อุตสาหกรรมโทรคมนาคม, การกำกับดูแล, ความมั่นคง

¹ ผู้อำนวยการส่วนพัฒนาและติดตามบังคับใช้กฎหมาย รักษาการ, สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ

* ผู้แต่ง, อีเมล: thipnattha.k@nbt.go.th

AI Regulatory Framework in Telecommunications Under the NBTC's supervision

Thipnattha Kangwarmgraisarn ^{1*}

Received 4 February 2026 Reviewed 2 June 2026 Accepted 11 June 2026

Abstract

Artificial Intelligence (AI) is increasingly becoming a tool that plays a significant role across multiple sectors worldwide, including mass media, telecommunications, and national security. In particular, the integration of AI into military and defense systems is rapidly reshaping the landscape of modern warfare, raising concerns regarding appropriate use, governance, and potential risks. Despite these concerns, AI also presents substantial opportunities to drive economic growth and enhance quality of life, especially in developing economies such as Thailand. As AI has the potential to enhance human capabilities and resolve complex social challenges, Thailand has articulated a national vision to become an AI-driven economy by 2027. However, the rapid development and deployment of AI technologies also introduce critical challenges related to ethics, transparency, accountability, data privacy, and cybersecurity. These risks cover a wide range of issues, including violations of data privacy, algorithmic bias, misuse of AI systems, and adverse impacts on human rights. Thus, it is a challenge for industry stakeholders to design effective governance and regulatory frameworks that balance innovation with responsibility as delayed regulatory responses may amplify these risks and undermine the positive potential of AI.

Keywords: Artificial Intelligence (AI), Telecommunications, Regulation, National Security

¹ Director of Legal Development and Enforcement Monitoring Division, Office of the National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC)

* Corresponding author: thipnattha.k@nbt.go.th

1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันความแพร่หลายของการนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาเป็นตัวช่วยในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ โดยเฉพาะในการให้บริการโทรคมนาคม เช่น การบริหารจัดการโครงข่ายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การตรวจจับและป้องกันลักษณะการใช้งานที่ผิดปกติ การบำรุงรักษาอุปกรณ์โครงข่ายเชิงคาดการณ์ การให้บริการลูกค้าผ่าน Chatbot (แชทบอต) นำเสนอผลิตภัณฑ์และบริการที่เหมาะสมตามลักษณะการใช้งานของลูกค้าแต่ละราย อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยี AI ยังมีข้อจำกัด ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ถูกต้อง ไม่สามารถคาดการณ์ได้ทั้งหมด ก่อให้เกิดความเสี่ยงจากการใช้งาน AI เช่น ความเสี่ยงด้านอคติ ความปลอดภัยทางไซเบอร์ และการละเมิดข้อมูลส่วนบุคคล [1] อีกทั้งในด้านของความปลอดภัยทางไซเบอร์เผชิญกับความท้าทายมากมาย ที่กระทบต่อความมั่นคงของประเทศ ทั้งแฮกเกอร์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น รูปแบบการโจมตีที่หลากหลาย หรือแม้กระทั่งการโจมตีโครงสร้างพื้นฐานที่เพิ่มขึ้น

2. เหตุผลและวัตถุประสงค์ในการศึกษา

ปัญญาประดิษฐ์ (AI) กำลังพลิกโฉมหลากหลายภาคส่วนทั่วโลก นำเสนอโอกาสสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและยกระดับคุณภาพชีวิตในประเทศไทย [2], [3] AI มีศักยภาพในการเสริมสร้างขีดความสามารถของมนุษย์และช่วยแก้ไขความท้าทายทางสังคมที่ซับซ้อน [3], [4] ประเทศไทยมีวิสัยทัศน์ที่จะก้าวสู่การเป็นเศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนด้วย AI ภายในปี พ.ศ. 2570 [5], [6]

อย่างไรก็ตาม การพัฒนาและการใช้งานระบบ AI ที่เติบโตอย่างรวดเร็วก่อให้เกิดความท้าทายที่สำคัญในด้านจริยธรรม ความโปร่งใส ความรับผิดชอบ ความเป็นส่วนตัวของข้อมูล และความปลอดภัยทางไซเบอร์ [2], [3], [7] การจัดทำบทความวิชาการนี้จึงมีเหตุผลและความสำคัญ ดังต่อไปนี้

2.1 การรับมือกับความท้าทายของ AI

ความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของ AI ทำให้คำจำกัดความและนโยบายที่ตายตัวกลายเป็นล้าสมัยอย่างรวดเร็ว [8] ความท้าทายด้านจริยธรรม เช่น ข้อมูลบิดเบือน/ข้อมูลเท็จ (Deep fakes) อคติทางอัลกอริทึม (Algorithm Bias) และประเด็นด้านความเป็นส่วนตัว/ความปลอดภัย [7] หากไม่ได้รับการกำกับดูแลที่เหมาะสม อาจบ่อนทำลายความไว้วางใจของสาธารณะและขัดขวางการนำ AI ไปใช้ในวงกว้าง

2.2 การส่งเสริมวัฒนธรรมอย่างรับผิดชอบ

การมีกรอบการกำกับดูแลที่ชัดเจนจะช่วยลดความเสี่ยงและสร้างความมั่นใจในการพัฒนา AI อย่างมีความรับผิดชอบ ซึ่งจะส่งเสริมให้นวัตกรรมเกิดขึ้นได้โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสังคม [2], [7]

2.3 การใช้ประโยชน์จากศักยภาพของ กสทช.

กสทช. มีอำนาจหน้าที่และความเชี่ยวชาญในการกำกับดูแลกิจการโทรคมนาคมและกิจการกระจายเสียง ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญที่ AI ต้องพึ่งพา การใช้ประโยชน์จากบทบาทที่มีอยู่ของ กสทช. จะช่วยให้การกำกับดูแลการใช้ระบบ AI ในอุตสาหกรรมเหล่านี้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [9], [10]

2.4 การประสานนโยบายระดับประเทศและระดับสากล

เพื่อให้ประเทศไทยสามารถบูรณาการนโยบายการใช้ระบบ AI ให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล และยกระดับให้ประเทศไทยเข้าสู่ฐานเศรษฐกิจกลาง AI ระดับภูมิภาค [6] อีกทั้ง วัตถุประสงค์หลักของการจัดทำบทความนี้ คือ เพื่อนำเสนอบทบาทและอำนาจหน้าที่ของ กสทช. ที่เกี่ยวข้องกับการกำกับดูแลการใช้ระบบ AI, นำแนวทางการกำกับดูแล AI ในระดับสากลมาศึกษา และนำเสนอแนวทางและข้อเสนอแนะสำหรับ กสทช. ในการกำกับดูแล AI ในกิจการโทรคมนาคมอย่างมีประสิทธิภาพ

3. วิวัฒนาการของการกำกับดูแลกิจการ โทรคมนาคมในประเทศไทย

กสทช. เป็นหน่วยงานกำกับดูแลอิสระที่จัดตั้งขึ้นภายใต้ พ.ร.บ. องค์กรจัดสรรคลื่นความถี่และกำกับการประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง วิทยุโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม พ.ศ. 2553 [11] มีภารกิจหลักในการบริหารจัดการคลื่นความถี่และกำกับดูแลกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม [9], [10] ขอบเขตความรับผิดชอบครอบคลุมการออกใบอนุญาต การกำกับดูแลโครงข่ายพื้นฐาน การกำกับดูแลและกำหนดอัตราค่าบริการ และการคุ้มครองสิทธิผู้บริโภค [10] การเดินทางของ กสทช. จากการกำกับดูแลคลื่นความถี่และเนื้อหาแบบดั้งเดิมไปสู่การมีส่วนร่วมอย่างแข็งขันในด้านความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ ความเป็นส่วนตัวของข้อมูล และการกำกับดูแลแพลตฟอร์มดิจิทัล แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับตัว ซึ่งให้ถึงความก้าวหน้าในการขยายความเชี่ยวชาญด้านการกำกับดูแลไปสู่ระบบ AI

การกำกับดูแลด้านดิจิทัลและข้อมูลส่วนบุคคล ขอบเขตการกำกับดูแลของ กสทช. มีการพัฒนาและปรับตัวอย่างต่อเนื่อง เพื่อรับมือกับความท้าทายของการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีสู่ดิจิทัลอย่างรวดเร็ว รวมถึงการกำกับดูแลที่มีผลต่อความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ และการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลในกิจการโทรคมนาคม โดย กสทช. ได้บังคับใช้มาตรการต่าง ๆ เพื่อต่อสู้กับอาชญากรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี เช่น การคัดกรองผู้ใช้งานที่มีพฤติกรรมน่าสงสัยและการระงับบริการที่ใช้ในกิจกรรมที่ผิดกฎหมาย [12]

ประกาศ กสทช. ฉบับที่มีผลบังคับใช้เมื่อวันที่ 5 กันยายน พ.ศ. 2566 ได้ปรับปรุงมาตรการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ใช้บริการโทรคมนาคมให้สอดคล้องกับพระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล พ.ศ. 2562 (PDPA) [13], [14] การปรับปรุงแก้ไขรวมถึงการกำหนดคำจำกัดความของข้อมูลส่วนบุคคล การกำหนดให้ต้องได้รับความยินยอมในการใช้ข้อมูล และการกำหนดให้ต้องแจ้งเตือนการละเมิดข้อมูล [13], [14]

นอกจากนี้ กสทช. ได้ร่วมกับสำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ (สพธอ. หรือ ETDA) ที่ได้รับมอบหมายให้กำกับดูแลแพลตฟอร์ม Over-The-Top (OTT) เช่น Netflix และ YouTube เพื่อสร้างความมั่นใจในด้านความปลอดภัย ความเป็นธรรม และความยั่งยืนในเศรษฐกิจดิจิทัล โดยมุ่งเน้นที่ประเด็นลิขสิทธิ์ ภาวะเฝ้าระวังเนื้อหา การคุ้มครองข้อมูล และการกำกับดูแลการแข่งขัน [15] จะเห็นได้ว่า ระบบ AI เป็นระบบที่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐานโทรคมนาคมอย่างมีนัยสำคัญ เช่น 5G สำหรับแอปพลิเคชัน AI แบบเรียลไทม์ และรองรับชุดข้อมูลขนาดใหญ่สำหรับการฝึกฝนด้วยอำนาจหน้าที่ของ กสทช. เป็นหน่วยงานกำกับดูแลโครงสร้างพื้นฐานในกิจการโทรคมนาคมและมีมาตรการคุ้มครองข้อมูลที่ใช้ในกิจการโทรคมนาคม กสทช. จึงเป็นหน่วยงานสำคัญในการกำหนดสภาพแวดล้อมพื้นฐานสำหรับการพัฒนาและการใช้งาน AI โดยเฉพาะในขอบเขตของกิจการโทรคมนาคมในประเทศไทย

ตารางที่ 1 บทบาทและอำนาจหน้าที่ของ กสทช. ที่เกี่ยวข้องกับการกำกับดูแล AI

บทบาทและอำนาจหน้าที่หลัก ของ กสทช.	ขอบเขตความรับผิดชอบ	ความเชื่อมโยงกับการกำกับดูแล AI
การบริหารจัดการคลื่นความถี่ ในกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และ กิจการโทรคมนาคม	การจัดสรรคลื่นความถี่ (เช่น 5G), การเชื่อมต่อโครงข่าย, การส่งเสริม การเข้าถึงอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง [3], [9], [10], [16]	มีผลโดยตรงต่อโครงสร้างพื้นฐานที่ AI พึ่งพา, การเข้าถึงบริการ AI ทั่วประเทศ
การกำกับดูแลสื่อดิจิทัล และเนื้อหา	การกำกับดูแลแพลตฟอร์ม OTT, การตรวจสอบโฆษณาที่เกินจริง/ ผิดกฎหมายด้วยการใช้ระบบ AI, การจัดการเนื้อหาที่ไม่เหมาะสม บนโซเชียลมีเดีย [11], [15]	กำกับดูแลการใช้ระบบ AI ในการสร้าง/ จัดการเนื้อหา, ปกป้องผู้บริโภคจาก AI ที่เป็นอันตราย (เช่น Deepfake, ข้อมูลบิดเบือน)
การคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล	การปรับปรุงกฎระเบียบ ให้สอดคล้องกับ PDPA, การกำหนด ให้ได้รับความยินยอมในการใช้ ข้อมูล, การแจ้งเตือนการละเมิด ข้อมูล [13], [14]	กำกับดูแลการเก็บรวบรวม, การใช้, การประมวลผลข้อมูลส่วนบุคคล โดย AI, ลดความเสี่ยง ด้านความเป็นส่วนตัว
ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์	การกำหนดมาตรการต่อต้าน อาชญากรรมเทคโนโลยี, การคัดกรองผู้ใช้บริการน่าสงสัย, การยืนยันข้อมูลผู้ใช้บริการ [12]	สร้างความมั่นใจในความปลอดภัย ของระบบ AI และข้อมูลที่ใช้, ป้องกันการใช้งาน AI ในทางที่ผิด
การคุ้มครองผู้บริโภค	การกำหนดมาตรการคุ้มครองสิทธิ ผู้บริโภคจากการถูกเอาเปรียบ จากผู้ประกอบกิจการ, กระบวนการ รับเรื่องร้องเรียน [10]	ขยายการคุ้มครองไปสู่ความเสียหาย ที่อาจเกิดจาก AI (เช่น อคติ, การตัดสินใจที่ไม่เป็นธรรม), การรับเรื่องร้องเรียนที่เกี่ยวข้องกับ AI

4. ภูมิทัศน์นโยบาย AI ของประเทศไทย

4.1 ยุทธศาสตร์และแผนปฏิบัติการ AI แห่งชาติ

ประเทศไทยได้พัฒนายุทธศาสตร์และแผนปฏิบัติการด้านปัญญาประดิษฐ์แห่งชาติ (พ.ศ. 2565-2570) โดยมีเป้าหมายที่จะเปลี่ยนประเทศให้มีระบบเศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนด้วย AI ภายในปี พ.ศ. 2570 [5], [6] เสาหลักสำคัญของยุทธศาสตร์นี้ประกอบด้วย การเตรียมความพร้อมด้านสังคม จริยธรรม กฎหมาย และกฎระเบียบสำหรับการประยุกต์ใช้ AI การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน การเพิ่มขีดความสามารถของมนุษย์ และการส่งเสริมการใช้ AI ในภาครัฐและเอกชน [5], [6] ยุทธศาสตร์นี้ตั้งเป้าหมายผลลัพธ์ที่สำคัญ เช่น ประชาชนไทยอย่างน้อย 600,000 คนมีความตระหนักรู้เกี่ยวกับกฎหมายและจริยธรรม AI การสร้างบุคลากรด้าน AI กว่า 30,000 คน และการเพิ่มจำนวนหน่วยงานที่ใช้ AI ให้ได้อย่างน้อย 600 แห่ง [5]

นอกจากนี้ ยังมีการจัดตั้งคณะกรรมการ AI แห่งชาติ ซึ่งมีนายกรัฐมนตรีเป็นประธาน เพื่อชี้นำยุทธศาสตร์นี้ [17] ภูมิทัศน์นโยบาย AI ของประเทศไทยสะท้อนให้เห็นถึงความพยายามอย่างรอบคอบในการสร้างสมดุลระหว่างการส่งเสริมนวัตกรรมและการสร้างความมั่นใจในการพัฒนา AI ที่มีความรับผิดชอบและมีจริยธรรม ควบคู่ไปกับการเน้นย้ำในยุทธศาสตร์ชาติเกี่ยวกับการพัฒนาอีโคซิสเต็ม (Ecosystem) แสดงให้เห็นถึงปรัชญาการกำกับดูแลเชิงรุกมากกว่าแนวทางการกำกับดูแลแบบจำกัดเพียงอย่างเดียว

4.2 ร่างพระราชบัญญัติ AI ของประเทศไทย: แนวคิดและหลักการ

ประเทศไทยกำลังอยู่ระหว่างการร่างกฎหมาย AI ฉบับแรก ซึ่งให้ความสำคัญกับการใช้งานอย่างมีความรับผิดชอบและการคุ้มครองสิทธิ โดยเปลี่ยนจากการใช้ "กฎหมายอ่อน" (แนวปฏิบัติ) ไปสู่การกำกับดูแลแบบแบ่งระดับความเสี่ยงด้วย "กฎหมายแข็ง" [2] ระบบ AI ที่มีความเสี่ยงสูง (เช่น ในภาคสาธารณสุข การเงิน และบริการภาครัฐ) จะอยู่ภายใต้มาตรการ

ที่เข้มงวด ในขณะที่แอปพลิเคชัน AIทั่วไปจะปฏิบัติตามแนวปฏิบัติที่ดีที่สุด [2], [7] ข้อพิจารณาที่สำคัญรวมถึงความรับผิดชอบของ AI ความโปร่งใสของอัลกอริทึม (Algorithm) และมาตรการปกป้องสิทธิมนุษยชน ตลอดจนการสร้างสมดุลระหว่างนวัตกรรมและกฎระเบียบ [2], [7]

สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ (ETDA) เป็นหน่วยงานสำคัญที่รับผิดชอบในการจัดทำแนวปฏิบัติและร่างกฎหมาย AI นี้ โดยร่วมมือกับศูนย์ธรรมาภิบาลปัญญาประดิษฐ์ (AI Governance Center: AIGC) [2], [18] ร่างกฎหมายเน้นหลักการต่าง ๆ เช่น การส่งเสริมความเจริญรุ่งเรืองและความสุขของมนุษย์ การยึดมนุษย์เป็นศูนย์กลาง การเข้าถึงที่ครอบคลุมและเป็นธรรม การเคารพคุณค่าทางจริยธรรม สิทธิมนุษยชน ความเป็นส่วนตัว ความโปร่งใส ความสามารถในการอธิบาย และความรับผิดชอบ รวมถึงการควบคุมโดยมนุษย์ [7] มีการเปลี่ยนแปลงจุดเน้นจาก "กฎหมาย AI ที่ควบคุม" ไปสู่ "กฎหมาย AI ที่สนับสนุน" (โดยใช้ Regulatory Sandbox) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการส่งเสริมนวัตกรรม AI ควบคู่ไปกับการรักษากฎป้องกันที่จำเป็น [18]

ยุทธศาสตร์ AI แห่งชาติวางวิสัยทัศน์และวัตถุประสงค์ในระดับสูง ในขณะที่ร่างกฎหมาย AI และกฎระเบียบที่ตามมา (รวมถึงจากหน่วยงานกำกับดูแลภาคส่วน เช่น กสทช.) เป็นกลไกในการเปลี่ยนแปลงวิสัยทัศน์นี้ให้เป็นกรอบการทำงานทางกฎหมาย และการปฏิบัติงานที่สามารถดำเนินการได้ ซึ่งสร้างผลกระทบเป็นลำดับขั้นจากนโยบายระดับชาติไปสู่การปฏิบัติในแต่ละภาคส่วน

4.3 ความท้าทายและโอกาสในการกำกับดูแล AI

4.3.1 ความท้าทาย : ความท้าทายสำคัญของการกำกับดูแล AI คือ การสร้างความมั่นใจในการคุ้มครองข้อมูลในขณะที่ยังคงส่งเสริมการแบ่งปันข้อมูลเพื่อการพัฒนาเครื่องมือ AI [6] การแก้ไขปัญหาช่องว่างด้านทักษะการใช้ AI และการสร้างสมดุลระหว่าง

นวัตกรรมกับด้านจริยธรรมยังคงเป็นประเด็นที่ซับซ้อน [6] ความเสี่ยงที่ระบบ AI อาจก่อให้เกิดอันตรายที่ไม่พึงประสงค์ จำเป็นต้องมีกลไกสำหรับการยกเลิก การซ่อมแซม และการปลดประจำการอย่างปลอดภัย [4] ความท้าทายที่เกิดจากการพัฒนาอย่างรวดเร็วของ AI ทำให้จำเป็นต้องมีแนวทางการกำกับดูแลที่ยืดหยุ่นและปรับตัวได้มากกว่ากฎระเบียบที่เข้มงวด ซึ่งหมายถึงการทบทวนและปรับปรุงนโยบายอย่างต่อเนื่อง

4.3.2 โอกาส : โอกาสที่เกิดขึ้นจากการนำ AI มาใช้ คือ สามารถเพิ่มผลิตภาพผลิตผล ปรับปรุงบริการ สาธารณะ และขับเคลื่อนการเติบโตทางเศรษฐกิจ [2], [3] การพัฒนากรอบกฎหมายที่ชัดเจนและโปร่งใสสามารถ แก้ไขปัญหาแอปพลิเคชัน AI ที่มีความเสี่ยงสูงและสร้างความไว้วางใจจากสาธารณะ [2], [18] Regulatory Sandbox นำเสนอสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมสำหรับการทดสอบและขยายขนาดระบบ AI ซึ่งส่งเสริมนวัตกรรม ในขณะที่ยังคงจัดการความเสี่ยง [3], [18] ความร่วมมือระหว่างประเทศและการปรับให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากลสามารถยกระดับตำแหน่งของประเทศไทยในฐานะ ศูนย์กลาง AI ระดับภูมิภาค [6]

ความกังวลด้านจริยธรรมและความปลอดภัย ที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขจะบ่อนทำลายความไว้วางใจของสาธารณะในการใช้ AI ซึ่งจะขัดขวางการนำไปใช้ในวงกว้าง การกำกับดูแลที่มีประสิทธิภาพจึงเป็น ข้อกำหนดเบื้องต้นสำหรับการตระหนักถึงศักยภาพสูงสุดของการใช้ AI

4.4 จริยธรรมและกฎหมายเกี่ยวกับการใช้ AI ในกิจการโทรคมนาคม

การใช้ AI ในกิจการโทรคมนาคมมีความเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับหลักการทางจริยธรรมและกฎหมาย ทั้งในระดับสากลและระดับประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในด้านที่ กสทช. มีอำนาจกำกับดูแลโดยตรง

4.4.1 หลักการกำกับดูแล AI สากล : กรอบการกำกับดูแล AI ระดับสากลได้เน้นย้ำถึงหลักการสำคัญ ที่ควรนำมาปรับใช้ในการพัฒนาและใช้งาน AI

4.4.1.1 OECD : ได้รับการรับรองในปี พ.ศ. 2562 และปรับปรุงในปี พ.ศ. 2567 ถือเป็น มาตรฐานระหว่างรัฐบาลฉบับแรกเกี่ยวกับ AI ซึ่งส่งเสริม AI ที่สร้างสรรค์และน่าเชื่อถือที่เคารพ สิทธิมนุษยชนและค่านิยมประชาธิปไตย [4] ประกอบด้วย หลักการที่ยึดคุณค่า 5 ประการ (การเติบโตที่ครอบคลุม สิทธิมนุษยชน ความโปร่งใส ความแข็งแกร่ง/ความปลอดภัย และความรับผิดชอบ) และข้อเสนอแนะ 5 ประการสำหรับผู้กำหนดนโยบาย [4]

4.4.1.2 กฎหมาย AI ของสหภาพยุโรป (EU AI Act) : เป็นกรอบกฎหมายที่ครอบคลุมฉบับแรกของโลกเกี่ยวกับ AI โดยใช้ระบบการจำแนกความเสี่ยง (ความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ ความเสี่ยงสูง ความเสี่ยงจำกัด และความเสี่ยงน้อย/ไม่มีความเสี่ยง) [8] กฎหมายนี้ ห้ามระบบ AI ที่ก่อให้เกิดภัยคุกคามที่ยอมรับไม่ได้ และ กำหนดข้อผูกพันที่เข้มงวดสำหรับ AI ที่มีความเสี่ยงสูง รวมถึงข้อกำหนดสำหรับการประเมินและลดความเสี่ยง ชุดข้อมูลคุณภาพสูง การบันทึกกิจกรรม เอกสารประกอบ การกำกับดูแลโดยมนุษย์ ความแข็งแกร่ง ความมั่นคง ปลอดภัยไซเบอร์ และความแม่นยำ [7], [18] นอกจากนี้ ยังกำหนดให้มีความโปร่งใสสำหรับ AI ที่มีความเสี่ยง จำกัด เช่น การเปิดเผยเนื้อหาที่สร้างโดย AI [7]

4.4.1.3 UNESCO ว่าด้วยจริยธรรม ของ AI : ได้รับการรับรองในปี พ.ศ. 2564 ถือเป็น มาตรฐานสากลฉบับแรกเกี่ยวกับจริยธรรม AI ซึ่งมี ผลบังคับใช้กับรัฐสมาชิกทั้ง 194 ประเทศของ UNESCO [9] หลักการสำคัญคือการคุ้มครองสิทธิมนุษยชนและศักดิ์ศรี ความเป็นมนุษย์ โดยอิงจากค่านิยมหลัก 4 ประการ และ หลักการหลัก 10 ประการ [8]

หลักการเหล่านี้เป็นรากฐานสากลที่ประเทศไทยควรยึดมั่น เพื่อส่งเสริมความไว้วางใจระหว่างประเทศและอำนวยความสะดวกในการไหลเวียนของข้อมูลข้ามพรมแดน และวางตำแหน่งประเทศไทยในฐานะผู้เล่นที่มีความรับผิดชอบในภูมิทัศน์ AI ระดับโลก ซึ่งจะเป็นตัวดึงดูดการลงทุนและความร่วมมือ แนวทางที่อิงความเสี่ยงของกฎหมาย AI ของสหภาพยุโรป ซึ่งร่างกฎหมายของประเทศไทยก็รับมาใช้ [2], [7] หมายความว่า ความพยายามในการกำกับดูแล

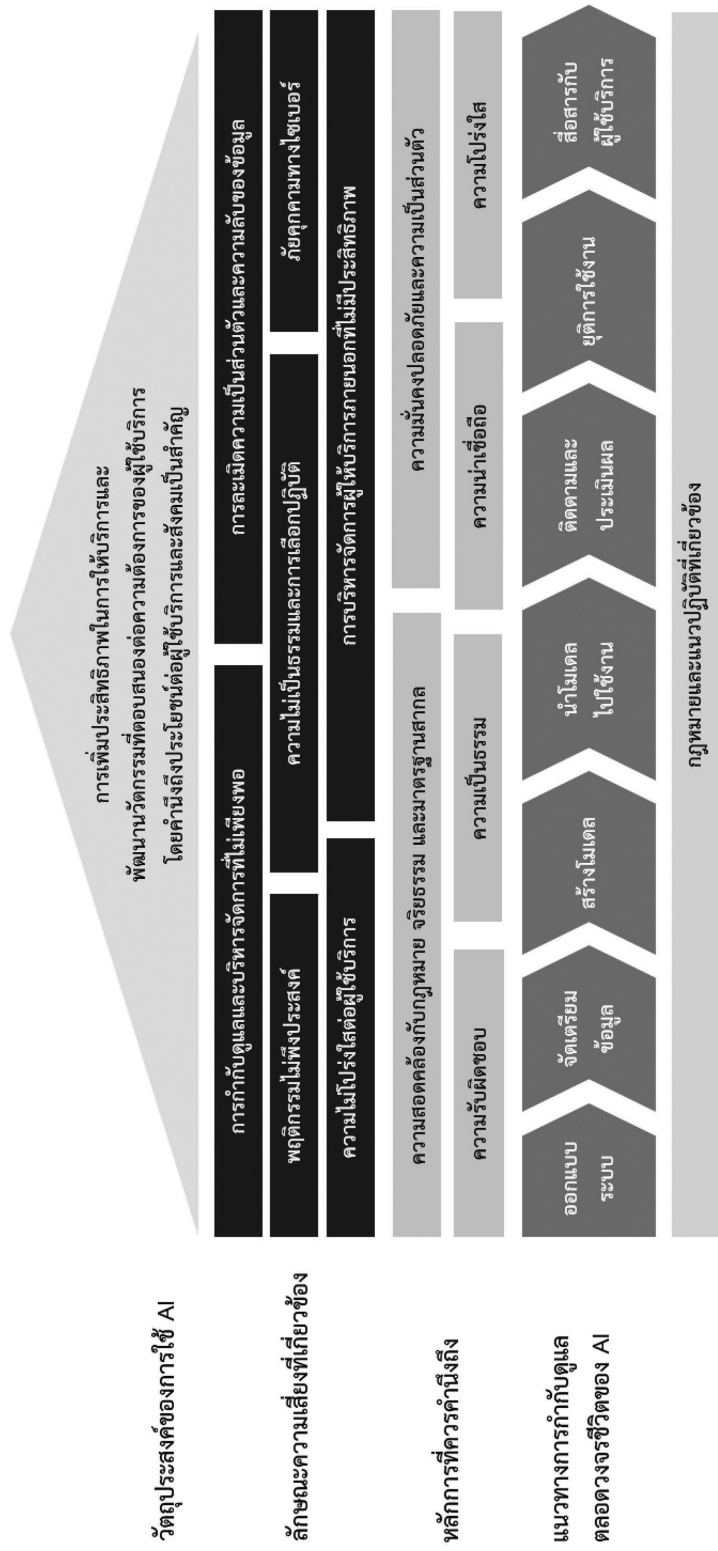
ของ กสทช. ควรให้ความสำคัญกับแอปพลิเคชัน AI ที่มีความเสี่ยงสูงสุดภายในโดเมนเฉพาะของตน เช่น AI ในโครงสร้างพื้นฐานโทรคมนาคมที่สำคัญ AI ที่ส่งผลต่อความปลอดภัยของเนื้อหาดิจิทัล หรือความเป็นส่วนตัวของข้อมูลผู้ใช้

อย่างไรก็ตาม ภาพรวมกรอบการกำกับดูแลการใช้งาน AI สามารถสรุปให้เห็นเป็นภาพรวมตามรูปที่ 1 [23]

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบหลักการกำกับดูแล AI ระดับสากล

กรอบการกำกับดูแล	หลักการ/ค่านิยมหลัก	ลักษณะ/แนวทางสำคัญ
OECD AI Principles [4]	การเติบโตที่ครอบคลุม, สิทธิมนุษยชน (ความเป็นธรรม, ความเป็นส่วนตัว), ความโปร่งใส, ความแข็งแกร่ง/ความปลอดภัย, ความรับผิดชอบ	อิงหลักการ, มาตรฐานระหว่างรัฐบาลฉบับแรก, ให้คำแนะนำเชิงปฏิบัติและยืดหยุ่น
EU AI Act [8]	ความปลอดภัย, สิทธิขั้นพื้นฐาน, ความโปร่งใส, การไม่เลือกปฏิบัติ, การกำกับดูแลโดยมนุษย์	อิงความเสี่ยง (ยอมรับไม่ได้, สูง, จำกัด, น้อย/ไม่มี), กรอบกฎหมายที่ครอบคลุมฉบับแรกของโลก, ห้าม AI ที่เป็นภัยคุกคามชัดเจน
UNESCO Recommendation on the Ethics of AI [9]	สิทธิมนุษยชน/ศักดิ์ศรีความเป็นมนุษย์, สังคมที่สงบสุข/ยุติธรรม, ความหลากหลาย/การไม่แบ่งแยก, สิ่งแวดล้อม/ระบบนิเวศที่สมบูรณ์	มาตรฐานจริยธรรมระดับโลก, เน้นสิทธิมนุษยชนเป็นศูนย์กลาง, มีหลักการ 10 ประการ

รูปที่ 1 ภาพรวมกรอบการกำกับดูแลการใช้งาน AI



วัตถุประสงค์ของการใช้ AI

ลักษณะความเสี่ยงที่เกี่ยวข้อง

หลักการที่ควรคำนึงถึง

แนวทางการกำกับดูแล
ตลอดวงจรชีวิตของ AI

5. หลักการเบื้องต้นในการกำหนดนโยบายการกำกับดูแล AI ในกิจการโทรคมนาคม

การกำกับดูแล AI ภายใต้บทบาทของ กสทช. ควรมีหลักการเบื้องต้นในการพิจารณาและวางกรอบเฉพาะในกิจการโทรคมนาคม เพื่อประกอบการจัดทำนโยบายที่เหมาะสม ยืดหยุ่นและสามารถปรับใช้ได้จริงกับลักษณะของกิจการโทรคมนาคม ดังนี้

5.1 การดำเนินการ

5.1.1 การวิเคราะห์และประเมินภูมิทัศน์ AI โดยทำความเข้าใจเทคโนโลยี AI ที่กำลังพัฒนาอย่างต่อเนื่อง รวมถึงความเสี่ยงและโอกาสที่เกี่ยวข้องกับการนำ AI มาใช้ในกิจการโทรคมนาคม อาทิ การนำ AI มาใช้ในงานด้านกิจการโทรคมนาคมอย่างไรที่พบบ่อย เช่น นำมาเป็นเครื่องมือตรวจความมีประสิทธิภาพของโครงข่ายพื้นฐาน คาดการณ์ก่อนเกิดภัยพิบัติ เป็นต้น อีกทั้ง การประเมินช่องว่างกฎหมายที่มีอยู่ในปัจจุบัน และวิเคราะห์ศักยภาพและบทบาทของ กสทช. ในการเข้ามามีบทบาท

5.1.2 การบูรณาการดำเนินงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น คณะกรรมการ AI แห่งชาติ กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม (MDES) และสำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ (ETDA) และกำหนดขอบเขตอำนาจหน้าที่ กสทช. ว่าควรมีส่วนร่วมเชิงรุกอย่างไรบ้าง เพื่อกำหนดขอบเขตอำนาจหน้าที่เฉพาะสำหรับการกำกับดูแล AI ภายในกรอบ AI แห่งชาติให้ชัดเจน เพื่อหลีกเลี่ยงความซ้ำซ้อนหรือช่องว่างในการกำกับดูแล [2], [17]

5.1.3 การพัฒนาแนวทางและเครื่องมือการกำกับดูแลเฉพาะด้านกิจการโทรคมนาคมที่เหมาะสม โดยควรพัฒนากรอบระเบียบ แนวปฏิบัติ หรือมาตรฐานเฉพาะสำหรับแอปพลิเคชัน AI ที่มีความเสี่ยงสูงที่มีการนำมาใช้ภายในกิจการโทรคมนาคม โดยบูรณาการหลักการ AI สากล (เช่น สิทธิมนุษยชน ความโปร่งใส ความรับผิดชอบ เป็นต้น) เข้าไปในกฎระเบียบที่มีอยู่ของ กสทช. [4], [7], [18]

5.1.4 การทดลองใช้ Regulatory Sandbox เพื่อจัดตั้งและขยายสำหรับแอปพลิเคชัน AI ภายใต้ขอบเขตอำนาจของ กสทช. ซึ่งช่วยให้สามารถทดลองภายใต้การควบคุมและสังเกตระบบ AI ได้ในสถานการณ์จริง ทำให้ กสทช. สามารถพัฒนากรอบระเบียบที่เหมาะสมและนำมาบังคับใช้ได้จริงซึ่งเป็นการส่งเสริมนวัตกรรมควบคู่กับการลดความเสี่ยงในการใช้แอปพลิเคชัน AI ที่อาจเกิดขึ้นใหม่ [3], [7], [18]

5.1.5 การเสริมสร้างศักยภาพบุคลากรและสร้างความตระหนักรู้ ลงทุนในการเพิ่มพูนทักษะบุคลากรของ กสทช. ในด้านเทคโนโลยี AI ด้านจริยธรรมและธรรมาภิบาล รวมถึงการร่วมมือกับสถาบันการศึกษาและศูนย์ธรรมาภิบาลปัญญาประดิษฐ์ (AI Governance Center: AIGC) [6], [18] พร้อมทั้งสร้างความตระหนักรู้แก่สาธารณะเกี่ยวกับผลกระทบและสิทธิของผู้บริโภคที่เกี่ยวข้องกับ AI

5.1.6 การสร้างกลไกความโปร่งใสและรับผิดชอบ พัฒนาแนวปฏิบัติที่ชัดเจนสำหรับความโปร่งใสและความสามารถในการอธิบายสำหรับระบบ AI ที่ดำเนินการภายในบริการที่ กสทช. กำกับดูแล โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ส่งผลกระทบต่อสิทธิผู้บริโภคหรือข้อมูลสาธารณะ (เช่น AI ที่ใช้ในการกลั่นกรองเนื้อหาหรือบริการลูกค้า) และควรสร้างกลไกความรับผิดชอบที่ชัดเจนสำหรับความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับ AI โดยอาจใช้ประโยชน์จากกรอบการคุ้มครองผู้บริโภคที่มีอยู่ [4], [7], [18]

5.2 วัตถุประสงค์ของการใช้ AI ในกิจการโทรคมนาคม [23]

ด้วยเทคโนโลยี AI สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ในกรอบของกิจการโทรคมนาคม จึงควรเริ่มจากการกำหนดวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนและเหมาะสม โดยคำนึงถึงประโยชน์ต่อประชาชนและสังคมเป็นสำคัญ รวมถึงพิจารณาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งาน AI เช่น ความพร้อมของข้อมูลและทรัพยากรที่เกี่ยวข้อง ความซับซ้อนและเวลาที่ใช้ในการดำเนินการ เป็นต้น เพื่อกำหนดแนวทางการกำกับ

ดูแลที่ครอบคลุมการนำ AI มาใช้งานจริง ซึ่งตัวอย่างของการนำ AI มาใช้ในกิจการโทรคมนาคม ทั้งในประเทศ ต่างประเทศ มีตัวอย่างดังนี้

5.2.1 การบริหารจัดการโครงข่ายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ครอบคลุมการบริหารจัดการคลื่นความถี่ การเชื่อมต่อโครงข่าย และการส่งเสริมการเข้าถึงอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญที่ AI พึ่งพา [3], [9], [10], [16] การกำกับดูแลในส่วนนี้จะมุ่งเน้นไปที่ความมั่นคงปลอดภัยของโครงข่ายที่ขับเคลื่อนด้วย AI และการคุ้มครองข้อมูลผู้ใช้ที่ถูกประมวลผลโดย AI

5.2.2 การบำรุงรักษาอุปกรณ์โครงข่ายเชิงคาดการณ์ โดยการตรวจจับความผิดปกติของอุปกรณ์ โดยจะติดตามอุปกรณ์โครงข่ายตลอด 24 ชั่วโมง หรือการพยากรณ์อายุการใช้งานของอุปกรณ์ เช่น แบตเตอรี่สำรองไฟหรืออะไหล่ที่เสาส่งสัญญาณ

5.2.3 การให้บริการลูกค้า เช่น การใช้ AI Chatbot ในการให้ข้อมูลเกี่ยวกับสิทธิพิเศษ สินค้าและบริการต่าง ๆ หรือ นำมาสร้างเป็น Voicebot เสมือนคุยกับพนักงาน call center หรือนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้งานเพื่อเสนอแพ็คเกจที่เหมาะสม

5.2.4 การตรวจจับและป้องกันลักษณะการใช้งานที่ผิดปกติ โดยการวิเคราะห์รูปแบบการใช้งาน รวมถึง SMS และ URL ที่ผิดปกติหรือต้องสงสัยว่าเป็นอันตราย และบล็อกทราฟฟิกต้องสงสัยทันที โดยตรวจจับทั้งด้านพฤติกรรมของมิจาชิปและป้องกันการเข้าถึงประชาชนหรือผู้ใช้บริการ รวมถึงนำมาวิเคราะห์ข้อมูลชีวภาพ (Biometric) เพื่อความปลอดภัยในการลงทะเบียน ป้องกันการปลอมแปลงใบหน้า (Deepfake)

5.3 หลักการที่ควรคำนึงถึง [19]

5.3.1 ความสอดคล้องกับกฎหมาย จริยธรรม และมาตรฐานสากล (Laws Ethics and International Standards) การออกแบบและพัฒนา AI ควรสอดคล้องกับกฎหมาย จริยธรรม และมาตรฐานสากล โดยเคารพ

ความเป็นส่วนตัว เกียรติ สิทธิเสรีภาพ และสิทธิมนุษยชน เช่น ใช้สร้างเนื้อหาที่บิดเบือนข้อมูล สนับสนุนพฤติกรรมที่ผิดกฎหมาย เป็นต้น

5.3.2 ความเป็นธรรม (Fairness) ควรคำนึงถึงความเป็นธรรม ความเท่าเทียม และความหลากหลายทางสังคมของผู้ใช้บริการ เพื่อไม่เป็นการเลือกปฏิบัติ และควรให้โอกาสประชาชนทุกคนได้รับประโยชน์อย่างทั่วถึง

5.3.3 ความมั่นคงปลอดภัยและความเป็นส่วนตัว (Security and Privacy) ควรใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการและพัฒนานวัตกรรมที่ตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้บริการได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงด้านความมั่นคงปลอดภัยควรจัดให้มีมาตรการป้องกันการโจมตีทางไซเบอร์ โดยปฏิบัติตามมาตรฐานหรือแนวทางการรักษาความมั่นคงปลอดภัยที่เป็นสากล เช่น มาตรฐานที่ประกาศโดย The ETSI Industry Specification Group on Securing Artificial Intelligence (ISG SAI) เป็นต้น และควรมีมาตรการคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลที่เหมาะสม

การคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลและความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ การประยุกต์ใช้ AI ในการประมวลผลข้อมูลผู้ใช้ และมาตรการป้องกันอาชญากรรมไซเบอร์ที่เกี่ยวข้องกับ AI [12], [13], [14] กสทช. มีบทบาทในการกำหนดให้ผู้ประกอบการโทรคมนาคมต้องมีนโยบายความเป็นส่วนตัวที่ชัดเจน และมีช่องทางในการรับคำขอจากเจ้าของข้อมูล ตลอดจนการแจ้งเตือนการละเมิดข้อมูลภายใน 72 ชั่วโมง [14] การกำกับดูแล AI ในส่วนนี้จะครอบคลุมถึงการรับรองคุณภาพและความสมบูรณ์ของชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกฝน AI เพื่อหลีกเลี่ยงอคติ และการสร้างความมั่นใจว่าระบบ AI มีความปลอดภัยจากการโจมตีทางไซเบอร์

5.3.4 ความโปร่งใส (Transparency) ต้องสามารถให้บริการด้วยความโปร่งใส สามารถอธิบายได้ว่า AI ถูกนำมาใช้ในกระบวนการใด มีหลักการทำงานอย่างไรหรือใช้ปัจจัยใดในการตัดสินใจ (Explainability)

และสามารถตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) รวมถึงสามารถวินิจฉัยปัญหาและความผิดพลาดได้ (Diagnosability)

5.3.5 ความรับผิดชอบ (Accountability) ควรกำหนดบทบาทหน้าที่และขอบเขตความรับผิดชอบ (Role and Responsibility) อย่างชัดเจนรวมถึงความรับผิดชอบต่อผลกระทบที่เกิดขึ้นจาก AI (Accountability) ตามหน้าที่ที่ได้รับมอบหมาย

5.3.6 ความน่าเชื่อถือ (Reliability) ควรมีความน่าเชื่อถือและสร้างความมั่นใจในการใช้งานต่อผู้ใช้ สามารถสร้างผลลัพธ์ที่เหมือนเดิมทุกครั้ง (Reproducibility) เมื่ออยู่ในสถานการณ์หรือได้รับข้อมูลที่เหมือนกัน และควรทนทานต่อเหตุการณ์ที่อาจเกิดความผิดพลาด (Robustness) ยังสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องหรือรับมือกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อบุคคล องค์กร และสังคม โดยกว้าง จึงควรควบคุมทั้งการออกแบบ พัฒนา และคุณภาพของข้อมูลที่นำมาใช้งาน รวมถึงมีช่องทางรับฟังความคิดเห็น (Feedback) ของผู้ใช้งานและนำมาปรับปรุงคุณภาพต่อไป

6. กรอบการกำกับดูแลการใช้งาน AI ของ กสทช. ในกิจการโทรคมนาคม

ในปัจจุบัน สำนักงาน กสทช. ยังไม่ได้มีการกำหนดหรือออกหลักเกณฑ์ที่ชัดเจนแน่นอน แต่อยู่ในขั้นตอนของการศึกษาและระดมความคิดเห็นจากหน่วยงานที่มีความเกี่ยวข้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มผู้ให้บริการโทรคมนาคม ซึ่งเป็นผู้ที่มีผลกระทบหลักไม่ว่าจะในฐานะของผู้นำ AI มาใช้ในบริการโทรคมนาคมของตนเอง หรือนำ AI มาเป็นทางเลือกให้ผู้ให้บริการได้ใช้ประโยชน์จากความสามารถของ AI ดังนั้น สำนักงาน กสทช. ได้มีการศึกษาและกำหนดหลักการเบื้องต้น ดังนี้

6.1 ขอบเขตในการกำกับดูแล [19]

6.1.1 เน้นเฉพาะที่เป็นการใช้ AI ในการให้บริการโทรคมนาคมตามใบอนุญาตกับผู้ให้บริการ และที่มีการใช้ข้อมูลผู้ให้บริการโทรคมนาคมในการประมวลผล

6.1.2 ไม่กำกับดูแลบริการอื่น ๆ ที่ไม่ใช้บริการโทรคมนาคม (มีหน่วยงานกำกับดูแลแล้ว เช่น บริการทางการเงิน)

6.1.3 List use case ในการใช้งาน และความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น (Risk-Based Approach) ระดับการกำกับดูแลจะเข้มข้นตามระดับความเสี่ยง

6.1.4 หลักการที่ควรคำนึงถึง เช่น หลักการจริยธรรมปัญญาประดิษฐ์ที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล และความรับผิดชอบต่อผลของการทำงานของ AI (accountability)

6.1.5 แนวทางปฏิบัติที่ดี เช่น ควรมีการจัดทำเกณฑ์การประเมินคุณภาพข้อมูล มีบันทึกการทำงานของระบบ AI เพื่อรองรับการตรวจสอบย้อนหลัง มีระบบคัดกรอง input output มีการทดสอบการโจมตีระบบรูปแบบต่าง ๆ อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ และควรต้องแจ้งและให้ทางเลือกกับผู้บริโภคด้วย

6.2 แนวนโยบายสำนักงาน กสทช. ในการบริหารจัดการความเสี่ยงของการใช้ AI [1]

6.2.1 ลักษณะความเสี่ยงจากการใช้ AI สามารถจำแนกความเสี่ยงออกเป็น 3 ด้านหลัก ดังนี้

6.2.1.1 ความเสี่ยงด้านข้อมูล (Data) ด้วยข้อมูลเป็นปัจจัยตั้งต้นในกระบวนการเรียนรู้ของ AI การใช้ข้อมูลที่ไม่มีคุณภาพ เช่น ไม่เป็นปัจจุบัน ไม่ถูกต้อง ไม่ครอบคลุม หรือไม่หลากหลายเพียงพอส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่น่าเชื่อถือ มีอคติ หรือเป็นเท็จ การเปิดเผยหรือรั่วไหลของข้อมูลสำคัญที่เป็นความลับ องค์กร ข้อมูลส่วนบุคคล หรือข้อมูลอ่อนไหว

6.2.1.2 ความเสี่ยงด้านการพัฒนาโมเดล (Model) เนื่องจากความสามารถของ AI ที่มีกลไกการเรียนรู้ คัดวิเคราะห์ และต่อยอดจากข้อมูลได้เอง

โดยไม่สามารถอธิบายผลลัพธ์ได้ (black-box) ทำให้เกิดความเสี่ยงที่ผลลัพธ์จากการทำงานของ AI อาจละเมิดกฎหมายหรือสิทธิมนุษยชน รวมถึงประมวลผลผิดพลาดไม่น่าเชื่อถือ เป็นเท็จได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจ และการให้บริการแก่ลูกค้าได้

6.2.1.3 ความเสี่ยงด้านภัยคุกคามทางไซเบอร์ (Cyber security) เป็นความเสี่ยงที่ AI อาจจะถูกโจมตีทางไซเบอร์ในรูปแบบต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์ให้ AI ทำงานผิดพลาด หยุดทำงาน หรือเกิดการรั่วไหลของข้อมูล

6.2.2 หลักการบริหารจัดการความเสี่ยงของการใช้งาน AI [1]

6.2.2.1 ผู้ให้บริการโทรคมนาคมมีการกำกับดูแลการใช้งาน AI ให้เป็นไปตามหลักการจริยธรรม ปัญหาประติษฐ์ที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไป เช่น มีความเท่าเทียม หลากหลาย ครอบคลุม และเป็นธรรม (fairness) มีความน่าเชื่อถือ (reliability) มีความมั่นคงปลอดภัย (security) รักษาความเป็นส่วนตัว (privacy) มีความโปร่งใส (transparency) และอธิบายที่มาของผลลัพธ์จากการใช้งาน AI ได้ (Explain ability)

6.2.2.2 ผู้ให้บริการโทรคมนาคมมีความรับผิดชอบต่อผลการทำงานของ AI (Accountability) รวมถึง ควรมีการเฝ้าติดตามความผิดปกติ สามารถสืบย้อนกลับได้ และควรมีการกำหนดหน้าที่และผู้รับผิดชอบที่ชัดเจน

6.2.2.3 ผู้ให้บริการโทรคมนาคมควรมีการออกแบบหรือใช้กลไกการตรวจสอบ (Audit) โดยอาจกำหนดกระบวนการหรือเครื่องมือที่สามารถแยกแยะได้ว่าข้อความ ภาพ หรือข้อมูลต่าง ๆ ถูกสร้างขึ้นโดยมนุษย์หรือระบบ AI

6.3 ความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์

ด้วยพระราชบัญญัติการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ พ.ศ. 2562 ได้กำหนดให้หน่วยงานควบคุมหรือกำกับดูแลหน่วยงานโครงสร้างพื้นฐานสำคัญทางสารสนเทศ จัดทำประมวลแนวปฏิบัติและ

กรอบมาตรฐานด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ของแต่ละหน่วยงานให้สอดคล้องกับนโยบายและแผนว่าด้วยการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำนักงาน กสทช. มีภารกิจในการกำกับดูแลโครงสร้างพื้นฐานสำคัญทางสารสนเทศด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและโทรคมนาคม จึงต้องมีการจัดทำประมวลแนวปฏิบัติและกรอบมาตรฐานด้านการรักษาความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์สำหรับหน่วยงานโครงสร้างพื้นฐานสำคัญทางสารสนเทศและโทรคมนาคม [20] ถือปฏิบัติ

นอกจากนี้ สำนักงาน กสทช. ยังมีภารกิจในการกำกับดูแลด้านมาตรฐานอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในบริการโทรคมนาคม โดยเฉพาะอุปกรณ์ในการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยเทคโนโลยี 5G ซึ่งผู้ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี 5G ไปใช้งาน โดยเฉพาะผู้ให้บริการซึ่งเป็นเจ้าของโครงข่ายโทรคมนาคม จำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการจัดหาหรือนำอุปกรณ์มาใช้ในการให้บริการซึ่งต้องมีความมาตรฐานและเทคโนโลยีด้านความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ เพื่อเป็นหลักประกันที่ดีว่าระบบการให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยเทคโนโลยี 5G จะไม่มีช่องโหว่ที่เสี่ยงต่อการถูกโจมตีทางไซเบอร์จึงมีการจัดทำแนวทางปฏิบัติด้านมาตรฐานด้านความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เทคโนโลยี 5G (5G Cybersecurity Guideline) [21]

สำนักงาน กสทช. ถือเป็นหน่วยงานที่มีภารกิจที่มีความเกี่ยวข้องกับความมั่นคงของชาติ เมื่อ กสทช. มีบทบาทในการกำกับดูแลโครงข่ายโทรคมนาคมที่เป็นความมั่นคงของชาติ (Critical Infrastructure) จึงแสดงให้เห็นถึงความตระหนักในขอบเขตอำนาจหน้าที่ของ กสทช. ที่จะช่วยให้ประเทศไทยมีความมั่นคงปลอดภัยในโครงสร้างพื้นฐานด้านโทรคมนาคมควบคู่ไปด้วย

7. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

กสทช.หรือสำนักงาน กสทช. นั้น อาจเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนการควบคุมหรือกำกับดูแลการใช้ AI ในกิจการโทรคมนาคม ด้วยอำนาจหน้าที่

ที่ กสทช. มีขอบเขตในการกำกับดูแลโครงสร้างพื้นฐานหลักอันเป็นพื้นฐานของการใช้ระบบ AI และมีอำนาจหน้าที่กำกับดูแลผู้ให้บริการโทรคมนาคม

แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยความใหม่และการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยี AI กสทช. ต้องพิจารณาอย่างรอบด้านว่าสามารถเข้าไปกำกับดูแลได้ในระดับใด เพียงใด ในระหว่างที่กฎหมายหลักเรื่อง AI ในประเทศไทยกำลังดำเนินการอยู่ กสทช. จึงทำได้เพียงศึกษาและกำหนดหลักการ ขอบเขตในเบื้องต้น เช่น การพิจารณากฎหมายที่บังคับใช้ภายใต้ กสทช. เกี่ยวกับข้อมูลผู้ใช้บริการ โดยเฉพาะบริการที่อยู่ภายใต้ภารกิจ (กิจการโทรคมนาคม กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการดาวเทียม) รวมถึงนโยบายในการบริหารจัดการความเสี่ยงของการใช้ AI ในกิจการโทรคมนาคม เป็นต้น

โดยสรุปแล้วจึงอาจมีข้อเสนอแนะ ดังต่อไปนี้

7.1 การใช้ Regulatory Sandbox เป็นเครื่องมือสำคัญในการทดสอบแนวทางนโยบายในสภาพแวดล้อมจริงที่มีการควบคุม เพื่อให้แน่ใจว่ามีความเหมาะสม และสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง โดยผู้ประกอบการสามารถทดลองนวัตกรรม AI ได้ภายใต้การกำกับดูแลอย่างใกล้ชิด และช่วยให้ กสทช. เรียนรู้และปรับปรุงกฎระเบียบได้อย่างยืดหยุ่น

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การนำ AI มาประยุกต์ใช้งานสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบใน Sandbox ควรมีแนวทางกำกับดูแลตลอดวงจรชีวิตของ AI มาช่วยเสริม เพื่อสร้างความเชื่อมั่นได้ว่า ระบบ AI ที่ได้ผ่านการทดสอบนั้นมีประสิทธิภาพอย่างครบถ้วน โดยแนวทางนั้นอาจแบ่งการพิจารณาได้ดังนี้ [19]

7.1.1 การออกแบบโซลูชัน

นอกจากการวิเคราะห์วัตถุประสงค์ของการใช้ AI ลักษณะความเสี่ยงที่เกี่ยวข้อง และหลักการที่ควรคำนึงถึง จากหัวข้อ 5 ควรมีการวางแผนและออกแบบโซลูชัน ผู้ให้บริการโทรคมนาคมอาจเลือกจัดหา AI

สำเร็จรูป (Off-the-shelf AI Product) หรือใช้โมเดลที่ได้รับการสอนมาแล้ว (Pre-trained Model) จากผู้ให้บริการโซลูชันด้าน AI มาปรับใช้ หรืออาจเลือกสร้างเองทั้งหมด

7.1.2 การจัดเตรียมข้อมูล

เมื่อการใช้งาน AI ต้องใช้ข้อมูลในการเรียนรู้และประมวลผล ดังนั้น ควรมีการกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของข้อมูลอย่างเหมาะสม เช่น การกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของข้อมูลที่ต้องการ การเชื่อมโยงข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ (Data Integration) ประเมินคุณภาพข้อมูลและปรับปรุงข้อมูลให้มีคุณภาพตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด การเก็บรักษาข้อมูลส่วนบุคคลอย่างมั่นคง เป็นต้น

7.1.3 การสร้างโมเดล AI

หากผู้ให้บริการโทรคมนาคมเลือกที่จะสร้างโมเดล AI เอง ควรควบคุมกระบวนการสร้างในแต่ละขั้นตอน เพื่อให้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการสร้างนั้น ประกอบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน 4 ขั้นตอน ดังนี้

7.1.3.1 การเตรียมอัลกอริทึมสำหรับสร้างโมเดล ซึ่งอาจพัฒนาขึ้นเองหรือใช้ที่มีการเปิดเผยซอร์สโค้ด (Open Source)

7.1.3.2 การสอนโมเดลด้วยชุดข้อมูล (Training Dataset) ที่เตรียมไว้ กรณีที่เป็นโมเดลประเภท Machine Learning

7.1.3.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพของโมเดลด้วยชุดข้อมูลสำหรับตรวจสอบ (Validation Dataset) และปรับแต่ง (Tuning) โมเดลจนกว่าจะให้ผลการตรวจสอบมีประสิทธิภาพ

7.1.3.4 การทดสอบโมเดลก่อนนำไปใช้งานจริง ด้วยชุดข้อมูลสำหรับทดสอบ (Testing Dataset) ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ไม่เคยถูกใช้ในขั้นตอนการสอนและการตรวจสอบโมเดลมาก่อน

แต่หากผู้ให้บริการโทรคมนาคมใช้ผลิตภัณฑ์จากภายนอก ย่อมมีหน้าที่ในการทดสอบและตรวจสอบ

ความเหมาะสมของกระบวนการสร้างโมเดลนั้นเช่นกัน ควบคู่กับมาตรการควบคุมเพื่อให้มั่นใจว่าสอดคล้องตามหลักการจริยธรรมปัญญาประดิษฐ์ กฎหมายและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องตามบริบทของการประยุกต์ใช้ AI ความเสี่ยงและผลกระทบที่เกิดขึ้นด้วย

7.1.4 การนำโมเดล AI ไปใช้งาน

ควรมีการทดสอบการทำงานของ AI ในสภาพแวดล้อมเสมือนจริง เพื่อทดสอบการทำงานร่วมกับขั้นตอนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง ตรวจสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพการทำงาน รวมถึงขีดความสามารถในการรองรับปริมาณการใช้งาน (Workload) และความสามารถในการตอบสนองภายในระยะเวลาที่ยอมรับได้ (Acceptable Latency Time) ซึ่งควรมีความยืดหยุ่นสามารถรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นหรือรองรับการขยายขอบเขตการใช้งานในอนาคตได้

7.1.5 การติดตามและประเมินผล

ควรมีการติดตามและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของ AI ในด้านความสำเร็จตามวัตถุประสงค์และประสิทธิภาพในการทำงานของ AI พร้อมปรับแต่งค่า (Model Tuning) เมื่อมีความจำเป็น

7.1.6 การยุติการใช้งาน AI

หากโมเดลนั้น ไม่สามารถตอบสนองความต้องการที่เปลี่ยนแปลงไปได้แล้ว หรือเทคโนโลยีล้าสมัยไปแล้ว ก็ควรพิจารณายุติโมเดลนั้นและนำโมเดลใหม่มาทดแทน โดยอาจพิจารณาดำเนินการตามมาตรฐานสากลด้านการจัดการความมั่นคงปลอดภัย และกฎหมายคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคลมาปรับใช้เพื่อป้องกันการรั่วรัอยทางดิจิทัลที่อาจกลายเป็นช่องโหว่ในอนาคต

7.1.7 การสื่อสารกับผู้ให้บริการ

การสื่อสารด้วยข้อมูลที่เพียงพอ ช่วยสร้างความเข้าใจและความมั่นใจต่อการใช้บริการนั้น ๆ แต่ควรพิจารณาอย่างรอบคอบในการเลือกข้อมูลที่จะเปิดเผยต่อสาธารณะ และใช้ภาษาที่เข้าใจง่าย นอกจากนี้ ควรจัดให้มีทางเลือกในการใช้บุคคลแทน AI และ

จัดให้มีช่องทางรับฟังความคิดเห็น ข้อเสนอแนะ และการยื่นคำร้องขอตรวจสอบการใช้งาน เพื่อนำมาปรับปรุงต่อไป

7.2 ส่งเสริมการพัฒนา AI อย่างรับผิดชอบและยั่งยืนในประเทศไทย : ด้วยการเน้นย้ำแนวปฏิบัติที่ดีที่สุด และข้อพิจารณาด้านจริยธรรม การศึกษาจะช่วยส่งเสริมสภาพแวดล้อมที่การพัฒนา AI ในประเทศไทยไม่เพียงแต่สร้างสรรค์นวัตกรรมเท่านั้น แต่ยังมีความรับผิดชอบต่อสังคม และยั่งยืนอีกด้วย

7.3 สร้างความเข้าใจแก่สาธารณะและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเกี่ยวกับบทบาทของ กสทช. ในการกำกับดูแล AI โดยชี้แจงความรับผิดชอบที่กำลังพัฒนาของ กสทช. ในยุคดิจิทัล ซึ่งจะช่วยให้มีความโปร่งใส และสร้างความไว้วางใจในอุตสาหกรรม ผู้บริโภค และสาธารณชนในวงกว้างเกี่ยวกับการกำกับดูแล AI

7.4 สนับสนุนการบูรณาการนโยบาย AI ของประเทศไทยให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล ด้วยการเปรียบเทียบความพยายามของไทยกับเกณฑ์มาตรฐานสากล การศึกษาจะช่วยอำนวยความสะดวกในการปรับนโยบาย AI ของประเทศไทยให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล ส่งเสริมความร่วมมือระหว่างประเทศ และยกระดับชื่อเสียงของประเทศในด้าน AI

อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า ระบบปัญญาประดิษฐ์ (AI) เป็นเครื่องมือสำคัญและเข้ามามีบทบาทอย่างรวดเร็วในวงการอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ แต่ในอีกมุมหนึ่งก็มีความสำคัญและนำไปใช้ในวงการเชิงความมั่นคงของประเทศ ซึ่งอุตสาหกรรมโทรคมนาคมนับเป็นส่วนสำคัญในการป้องกันประเทศด้านข้อมูลส่วนบุคคลที่เกี่ยวข้องกับการให้บริการโทรคมนาคม การสื่อสารถือเป็นช่องทางการติดต่อระหว่างกันทั้งภายในและภายนอกประเทศ จะเห็นได้จากปัญหาเรื่องการก่ออาชญากรรมทางเทคโนโลยีโดยผ่านช่องทางโทรศัพท์ อินเทอร์เน็ต เว็บไซต์ ข้อความสั้น หาก กสทช. และหน่วยงานด้านความมั่นคงที่เกี่ยวข้อง สามารถควบคุมการนำระบบ AI มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

และเกิดความรับผิดชอบร่วมกัน จะเป็นหนทางหนึ่งที่สามารถปกป้องประชาชนในประเทศ และเศรษฐกิจภาพรวมของประเทศจากภัยคุกคามทางไซเบอร์ได้ไม่มากนัก

นอกจากนี้ ปรากฏตัวอย่างการนำระบบ AI มาใช้ในหน่วยงานความมั่นคงที่ช่วยให้การทำงานเพื่อปกป้องประเทศมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การนำมาควบคุมอากาศยานไร้คนขับ (Drone) การใช้ในด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์ การนำ AI แบบรู้สร้างมาประยุกต์ใช้ทางการทหาร [20], [22] การนำ AI มาใช้รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลข่าวกรอง เป็นต้น ดังนั้น คงต้องติดตามและศึกษาต่อไปกับบทบาทของ AI ที่สามารถเข้าไปแทรกซึมในทุก ๆ ภาคส่วนของโลกนี้ แต่ในความเห็นที่สำคัญควรจะต้องพัฒนาควบคู่กันไปทั้งด้านเทคโนโลยีกับด้านจริยธรรมของการใช้เทคโนโลยีให้มีความสมดุลกันเพื่อสร้างให้โลกใบนี้เป็นไปอย่างไม่เอียงไปด้านใดด้านหนึ่งจนเกินไป

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of the National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC), “(Draft) NBTC policy guideline on risk management of artificial intelligence (AI) usage in telecommunications,” presented at the Focus Group Meeting on Draft NBTC Policy Guideline, Nov. 26, 2025. [In Thai].
- [2] Tilleke & Gibbins, “Thailand’s AI Act: Navigating the Future of AI Regulation,” Tilleke & Gibbins, 2024. [Online]. Available: <https://www.tilleke.com/insights/thailands-ai-act-navigating-the-future-of-ai-regulation/>. (accessed May 15, 2024).
- [3] “NBTC to push for AI infrastructure, innovation,” Bangkok Post, Feb. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.bangkokpost.com/thailand/general/2749503/nbtc-to-push-for-ai-infrastructure-innovation>. (accessed May 15, 2024).
- [4] OECD, “OECD AI Principles,” OECD.AI. <https://oecd.ai/en/ai-principles> (accessed May 15, 2024).
- [5] Ministry of Digital Economy and Society (MDES), “National AI Strategy and Action Plan,” 2022. [Online]. <https://www.mdes.go.th/view/1/National%20AI%20Strategy%20and%20Action%20Plan>. (accessed May 15, 2024).
- [6] ASEAN, “Thailand’s National AI Strategy and Action Plan (2022–2027),” *ASEAN Policy Brief*, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://asean.org/wp-content/uploads/2023/04/ASEAN-Policy-Brief-on-Thailands-National-AI-Strategy-and-Action-Plan-2022-2027.pdf>. (accessed May 15, 2024).
- [7] Baker McKenzie, “Thailand’s Draft AI Act: A Balancing Act Between Innovation and Regulation,” BakerMcKenzie.com, Feb. 2024. <https://www.bakermckenzie.com/en/insight/Publications/2024/02/thailands-draft-ai-act-a-balancing-act-between-innovation-and-regulation> (accessed May 15, 2024).
- [8] European Commission, “The EU AI Act: What It Is and How It Will Impact You,” European Commission, 2024. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/artificial-intelligence/ai-act_en. (accessed May 15, 2024).

- [9] UNESCO, “Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence,” UNESCO, Paris, France, Rep. SHS/BIO/REC-AI/2021/1, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380455>. (accessed May 15, 2024).
- [10] National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC), “About NBTC,” NBTC. <https://www.nbtc.go.th/About-NBTC.aspx> (accessed May 15, 2024).
- [11] Act on Organization to Assign Radio Frequency and to Regulate the Broadcasting and Telecommunications Services, B.E. 2553, *Royal Thai Government Gazette*, vol. 127, no. 78 A, pp. 1–47, Dec. 19, 2010. [Online]. Available: <https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2553/A/090/1.PDF>. [In Thai].
- [12] National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC), “NBTC’s roles and responsibilities,” NBTC. <https://www.nbtc.go.th/About-NBTC/NBTC-Roles-and-Responsibilities.aspx> (accessed May 15, 2024).
- [13] “NBTC steps up fight against cybercrime,” The Star, Jul. 20, 2023. [Online]. Available: <https://www.thestar.com.my/aseanplus/aseanplus-news/2023/07/20/nbtc-steps-up-fight-against-cybercrime> (accessed May 15, 2024).
- [14] “NBTC enhances personal data protection for telecom users,” *The Nation*, Aug. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.nationthailand.com/thailand/general/40030580> (accessed May 15, 2024).
- [15] Notification of the National Broadcasting and Telecommunications Commission on Measures for the Protection of Telecommunications Subscribers’ Rights Concerning Personal Data, Privacy Rights, and Freedom of Telecommunications, B.E. 2566, *Royal Thai Government Gazette*, vol. 140, no. 56 A, Sep. 4, 2023. [Online]. Available: <https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2566/A/056/1.PDF>. [In Thai]. (accessed May 15, 2024).
- [16] “ETDA to regulate OTT platforms,” Bangkok Post, May 22, 2020. [Online]. Available: <https://www.bangkokpost.com/business/1922571/etda-to-regulate-ott-platforms> (accessed May 15, 2024).
- [17] “PM chairs National AI Committee meeting,” *The Government Public Relations Department*, Oct. 23, 2023. [Online]. Available: <https://thainews.prd.go.th/th/news/detail/TCATG231023150529068> (accessed May 15, 2024).
- [18] Electronic Transactions Development Agency (ETDA), “ETDA launches AI Governance Clinic,” ETDA. <https://www.etda.or.th/th/new-event/news/ETDA-launches-AI-Governance-Clinic.html> (accessed May 15, 2024).

- [19] Office of the National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC), “Artificial intelligence (AI) regulation under the role of NBTC in telecommunications,” presented at the Focus Group Meeting, NBTC, Jan. 20, 2026. [In Thai].
- [20] Telecommunications Regulation Bureau, “Code of practice and cybersecurity standard framework for critical information infrastructure organizations in information technology and telecommunications,” Office of the National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC), Dec. 7, 2022. [In Thai].
- [21] Telecommunications Regulation Bureau, “Cybersecurity standard guideline for 5G mobile network devices (5G cybersecurity guideline),” Office of the National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC), Dec. 21, 2023. [In Thai].
- [22] K. Bunnag, “Generative artificial intelligence and its military applications,” *Defence Technology Academic Journal*, vol. 6, no. 13, pp. 28–41, Jan.–Jun. 2024. [In Thai].
- [23] Office of the National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC), “(Draft) Regulatory framework on the use of artificial intelligence (AI) in telecommunications services,” internal document, NBTC, Apr. 2026. [In Thai].

การพัฒนาแบบจำลองการประมาณระยะเวลาการบินของ โดรนปีกหมุนแบบหลายใบพัด โดยใช้ข้อมูลคุณลักษณะทั่วไปของระบบขับเคลื่อนและแบตเตอรี่

พิมพ์ชนก ภักดีคง¹ และ ธนันต์ ยมจินดา^{2*}

บทคัดย่อ

ขีดความสามารถในการบินลอยตัวอยู่กับที่เป็นหนึ่งในประสิทธิภาพที่สำคัญสำหรับอากาศยานไร้คนขับปีกหมุนแบบหลายใบพัด (โดรน) สำหรับการประยุกต์ใช้ในการสำรวจระยะไกลและการขนส่งสัมภาระ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาแบบจำลองทั่วไปสำหรับการทำนายขีดความสามารถในการบินอยู่กับที่ โดยใช้ข้อมูลทั่วไปของใบพัด มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน และแบตเตอรี่สำหรับโดรนยกของหนัก (น้ำหนักมากกว่า 25 กิโลกรัม) ที่มีวางจำหน่ายในท้องตลาด คุณลักษณะเฉพาะของระบบใบพัด มอเตอร์ และแบตเตอรี่ ซึ่งส่งผลต่อขีดความสามารถในการบินอยู่กับที่ ถูกวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลการทดสอบที่เปิดเผยในเว็บไซต์ของผู้ผลิตและปรับปรุงให้เป็นสมการประมาณค่าอย่างง่ายสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นทำนายขีดความสามารถในการบินลอยตัวอยู่กับที่โดยการประมาณค่าความต้องการกระแสไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อน และประมาณระยะเวลาที่ระบบแบตเตอรี่สามารถจ่ายค่ากระแสไฟฟ้านั้นได้ การทำนายความต้องการกระแสไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อน มีค่า Root Mean Square Error เท่ากับ 8.59% โดยมีความผิดพลาดน้อยกว่า 5% ใน 43.5% ของชุดข้อมูลการทดสอบ ที่มี และน้อยกว่า 10% ใน 81.9% ของชุดข้อมูล กระบวนการพัฒนาแบบจำลองการทำนายขีดความสามารถในการบินลอยตัวของโดรนยกของหนักที่นำเสนอนี้สามารถนำไปใช้สำหรับการเลือกใช้งานโดรน การปรับแต่งระบบย่อยภายในโดรน และการวางแผนสำหรับภารกิจที่เกี่ยวข้องได้ต่อไป

คำสำคัญ: ขีดความสามารถในการลอยตัว แบบจำลองในการทำนาย โดรนขนส่งของ อากาศยานปีกหมุนหลายใบพัด

¹ ฝ่ายเทคโนโลยีสารสนเทศ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: thanan.y@dti.or.th

Development of Prediction Model for Hovering Endurance of Heavy-lifting, Multirotor Drone using General Specifications of Propulsion and Battery Systems

Pimchanok Pakdeekong¹ and Thanan Yomchinda^{2*}

.....

Abstract

Hovering endurance is one of the critical performance parameters for multirotor unmanned aerial vehicles (UAVs) in remote sensing and delivering applications. This study aims to obtain a generic model for hovering endurance prediction by using general specifications of commercial propeller, brushless direct current (BLDC) motor, and battery for heavy lifting drones (weighing over 25 kg.). The characteristics of propeller, motor, and battery sub-systems that govern the hovering endurance are analyzed using experimental data published in commercial websites and simplified for the prediction model. The proposed model predicts the hovering endurance by estimating the required electric current of the propulsion system and estimating the time duration that the battery can provide that required current. The prediction of electric current required from propulsion systems achieved the root mean square error of 8.59% and showed a prediction error of less than 5% on 43.5% of the available data points, and less than 10% on 81.9% of the data. A framework for hovering endurance prediction of heavy lifting drone is presented and applicable for platform selection, configuration optimization, and mission planning.

Keywords: Hovering Performance, Prediction Model, Heavy-lifting Drone, Multirotor

¹ Information Technology Department, Defence Technology Institute

² Research & Development, Defence Technology Institute

* Corresponding author: thanan.y@dti.or.th

1. บทนำ

อากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด (Multi-rotor Unmanned Aerial Vehicles) เป็นอากาศยานปีกหมุน (Rotary Wing Aircraft) ขนาดเล็กที่ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน จากจุดเด่นในความเรียบง่ายในการใช้งาน ชีตความสามารถในการขึ้นลงแนวดิ่ง (Vertical Take-off and Landing, VTOL) และการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ติดตั้งได้อย่างเอนกประสงค์ ทำให้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน ในประเทศไทยได้มีการใช้งานอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดในงานทางด้านการถ่ายภาพทางอากาศ การสำรวจระยะไกล และการเกษตร

อากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดโดยทั่วไปใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นเครื่องย่นในการขับเคลื่อนเพื่อสร้างแรงยกเพื่อการลอยตัว และใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบขับเคลื่อนและระบบไฟฟ้าอื่น ๆ บนอากาศยาน ระยะเวลาในการบินเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้งานอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด เนื่องจากระบบใบพัดมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพในการสร้างแรงยกและความจำเป็นต้องใช้พลังงานในการสร้างแรงยกอย่างต่อเนื่องเพื่อรักษาความสูงในการบิน อีกทั้งปริมาณพลังงานที่บรรจุได้ในแบตเตอรี่ถูกจำกัดด้วยน้ำหนักของแบตเตอรี่ด้วย และอากาศยานจำเป็นต้องแบกรับน้ำหนักรวมของแบตเตอรี่ตลอดเวลาทำการบิน ทำให้เกิดเป็นข้อจำกัดทางด้านระยะเวลาการบินขึ้น

ข้อจำกัดทางด้านระยะเวลาการบินนี้เป็นความท้าทายสำหรับผู้พัฒนาประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด ในการพิจารณาเลือกกระบบใบพัด ระบบมอเตอร์ และระบบแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับสัมภาระบรรทุก (Payload) และมีขีดความสามารถทางการบินที่เพียงพอต่อการปฏิบัติการ และเป้าหมายหลักในการวิจัยและพัฒนาแบบต่าง ๆ ในอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดในปัจจุบัน เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและส่งผลให้มีระยะเวลาการบินเพิ่มมากขึ้นด้วย

การทำนายขีดความสามารถในการบินของอากาศยาน โดยส่วนใหญ่มักจะใช้การวิเคราะห์จากการใช้พลังงานในการบิน [1] ระยะเวลาในการบินของอากาศยานที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงอาจทำนายได้จากสัดส่วนทางน้ำหนักของเชื้อเพลิงและอากาศยาน ร่วมกับอัตราการใช้เชื้อเพลิง

ในการบิน ดังเช่นสมการของ Breguet ซึ่งทำนายระยะเวลาการบิน (Endurance) ของอากาศยาน จาก ค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่อแรงขับ (Thrust-specific fuel consumption, C_T) แรงขับเคลื่อนจากเครื่องยนต์ที่จำเป็นในการบินอากาศยานน้ำหนัก W (หรือ $T(W)$) น้ำหนักตั้งต้นของอากาศยานที่รวมน้ำหนักเชื้อเพลิง (W_0) และน้ำหนักสุดท้ายของอากาศยานหลังใช้เชื้อเพลิงหมดแล้ว (W_f) ตามสมการ

$$t = - \int_{W_0}^{W_f} \frac{1}{C_T T(W)} dW \quad (1)$$

ส่วนระยะเวลาในการบินของอากาศยานที่ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียวขณะทำการบิน อาจทำนายจากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เก็บอยู่ในแบตเตอรี่ (Q_b) และอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ ($P_{discharge}$) ได้

$$t = \frac{Q_b}{P_{discharge}} \quad (2)$$

สำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกำลังเครื่องย่นโดยระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC motor, BLDC) จากนั้น กำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าในรูปของแรงบิด (Torque) และความเร็วรอบของเพลาส่งกำลัง (RPM) จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแรงขับเคลื่อน (Rotor Thrust) ด้วยระบบใบพัด ซึ่งอัตราการใช้พลังงานในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักรวมของอากาศยานและลักษณะในการทำการบิน อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่อีกส่วนหนึ่งจะถูกใช้โดยระบบย่อยอื่น ๆ บนอากาศยาน (อาทิ ระบบควบคุมการบิน ระบบสื่อสาร เป็นต้น) ซึ่งมีการใช้พลังงานที่ไม่ขึ้นอยู่กับน้ำหนักอากาศยาน ดังนั้นหากเราทราบหรือสามารถทำนายอัตราการใช้พลังงานหรืออัตราการสูญเสียพลังงานในระบบย่อยต่าง ๆ ก็จะสามารถทำนายขีดความสามารถทางด้านระยะเวลาในการบินของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดได้ บทความนี้นำเสนอแนวทางการศึกษาและวิเคราะห์ขีดความสามารถด้านระยะเวลาการบินของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดจากข้อมูลคุณลักษณะทั่วไป (General Specifications) ของระบบใบพัด ระบบมอเตอร์ และระบบแบตเตอรี่ที่ติดตั้งบนอากาศยาน

โดยการพัฒนาแบบจำลองทั่วไปสำหรับทำนายคุณลักษณะเฉพาะทางประสิทธิภาพของระบบใบพัด ระบบมอเตอร์ และระบบแบตเตอรี่จากทฤษฎีพื้นฐานร่วมกับข้อมูลการทดสอบ เพื่อใช้ทำนายขีดความสามารถในการบินลอยนิ่งอยู่กับที่ (Hover) สำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดที่มีน้ำหนักขึ้นบินมากกว่า 25 กิโลกรัม

2. แนวทางการประมาณระยะเวลาในการบิน

การประมาณระยะเวลาในการบินลอยนิ่งอยู่กับที่ของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด อาจตั้งต้นจากกำลังงานที่ระบบใบพัดต้องการในการสร้างแรงยกเท่ากับน้ำหนักของอากาศยาน จากนั้นจึงพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ระบบมอเตอร์ต้องการในการสร้างกำลังงานสำหรับใบพัด แล้วจึงพิจารณาพลังงานไฟฟ้าของระบบแบตเตอรี่ที่สามารถจ่ายได้สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ระบบมอเตอร์ต้องการ ซึ่งอาจพิจารณาในรูปของประสิทธิภาพ (η) ของระบบย่อยได้

$$\eta_{propeller} = \frac{P_i(W)}{P_{motor}} \quad (3)$$

$$\eta_{motor} = \frac{P_{motor}}{P_{discharge}} \quad (4)$$

$$\eta_{battery} = \frac{P_{discharge}}{Q_b/t} \quad (5)$$

2.1 ระบบใบพัด (Rotor System)

ระบบใบพัดสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด โดยทั่วไปจะใช้ใบพัดที่มีมุมใบพัด (blade pitch angle) คงที่ และมักใช้รูปแบบใบพัดเดี่ยว (Single rotor) หรือแบบใบพัดคู่ (Coaxial rotor) สำหรับระบบใบพัดเดี่ยว (Single rotor system) กำลังงานในอุดมคติ (Ideal power) ที่ระบบใบพัดต้องการในการสร้างแรงขับ (T) สามารถประมาณได้โดยใช้ทฤษฎีโมเมนตัม (Momentum Theory) ซึ่งให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับจากใบพัดกับการไหลของอากาศที่มีความหนาแน่น ρ ผ่านพื้นที่ใบพัด A_r ในแนวตั้งฉากได้

$$T = 2\rho A_r (V_c + v)v \quad (6)$$

โดย V_c คือ ความเร็วของอากาศโดยรอบตามแนวแกนหมุนของใบพัด และ v คือ ความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นจากการสร้างแรงขับของใบพัด (Induced velocity) กำลังงานในอุดมคติในการสร้างแรงขับของใบพัด สามารถ

ประมาณได้จากกำลังงานที่ใบพัดเพิ่มให้กับอากาศ (Induced power) ได้ดังสมการ

$$P_i = T \left(\frac{V_c}{2} + \sqrt{\frac{V_c^2}{4} + \frac{T}{2\rho A_r}} \right) \quad (7)$$

แรงขับและกำลังงานของใบพัดอาจปรับให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ทางด้านแรง (Thrust coefficient) และสัมประสิทธิ์ทางด้านกำลังงาน Power coefficient) เพื่อลดผลกระทบจากขนาดและความเร็วในการหมุนของใบพัดได้โดย

$$C_T = T/\rho A_r (\Omega R_r)^2, C_P = P/\rho A_r (\Omega R_r)^3 \quad (8)$$

โดย Ω คือ ความเร็วรอบของใบพัด และ R_r คือ รัศมีของใบพัด

ประสิทธิภาพของระบบใบพัด คือ สัดส่วนของกำลังงานในอุดมคติในการสร้างแรงขับต่อกำลังงานที่ระบบใบพัดต้องการในความเป็นจริงในการเอาชนะแรงต้านอากาศและสร้างแรงขับ ซึ่งคือกำลังงานที่มอเตอร์ส่งมาให้ในรูปแรงบิด (τ) และความเร็วรอบเพลาส่งกำลัง (ω) ประสิทธิภาพของใบพัดในขณะลอยนิ่ง (Hover) อาจแสดงในรูป Figure of Merit (FM) ดังสมการ

$$\eta_{propeller} = FM = \frac{P_i}{K_i P_i + P_o} = \frac{1}{\tau \omega} \sqrt{\frac{T^3}{2\rho A_r}} \quad (9)$$

โดย K_i คือ สัดส่วนที่เพิ่มของกำลังงาน Induced power เนื่องจากการสูญเสียจากความไม่สม่ำเสมอของการไหล (non-uniform inflow) ร่วมกับการสูญเสียจากการไม่เป็นไปตามสมมุติฐานอื่น ๆ และ P_o คือ กำลังงานที่สูญเสียจากแรงต้านอากาศ ซึ่งทั้งสองค่านี้เป็นคุณลักษณะเฉพาะของใบพัด

2.2 ระบบมอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Motor System)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเป็นกำลังงานในการหมุนใบพัดสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด เนื่องจากมีจุดเด่นที่ความกะทัดรัด ประสิทธิภาพสูง และอัตราส่วนกำลังขับต่อน้ำหนักสูง [2, 3] โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนสองชิ้นเชื่อมติดกันด้วยตลับลูกปืน (Bearing) คือ ส่วนที่หมุนได้ (Rotor) ซึ่งติดตั้งแม่เหล็กถาวร และส่วนที่อยู่นิ่ง (Stator) ซึ่งติดตั้งขดลวดเหนี่ยวนำที่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นได้เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้า

โดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้จะทำให้เกิดแรงกระทำต่อแม่เหล็กถาวรและทำให้ส่วน Rotor เกิดการหมุน และในขณะเดียวกันการหมุนของแม่เหล็กถาวรก็ทำให้เกิดความแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ในขดลวดเหนี่ยวนำด้วย การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านสามารถถูกอธิบายเบื้องต้นได้ด้วยวงจรที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่อกันแบบอนุกรม ดังสมการ

$$L_m \frac{d}{dt} i + R_m i + \frac{\omega}{K_V} = V_m \quad (10)$$

โดย L_m, R_m คือ ค่าความเหนี่ยวนำและความต้านทานของขดลวด i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด K_V คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว (Speed constant, KV rating) ของมอเตอร์ไฟฟ้า และ V_m คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ

แรงที่กระทำบนส่วนแม่เหล็กถาวรจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นแรงบิดที่มอเตอร์สร้างได้ อาจประมาณค่าเป็นสัดส่วนกับกระแสไฟฟ้าในขดลวดเหนี่ยวนำตามค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque constant, K_t) ของมอเตอร์ไฟฟ้า ดังสมการ

$$\tau_i = K_t i \quad (11)$$

และความเร็วในการหมุนของเพลาส่งกำลังของมอเตอร์อาจอธิบายได้ด้วยสมการการเคลื่อนที่เชิงมุม ดังสมการ

$$J \frac{d}{dt} \omega + D_v \omega = \tau_i - \tau - \tau_{loss} \quad (12)$$

โดย J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของส่วน Rotor ของมอเตอร์ D_v คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Viscous damping coefficient) τ คือ แรงบิดจาก load และ τ_{loss} คือ แรงบิดจากการสูญเสียกำลังงานอื่น ๆ ภายในมอเตอร์ (อาทิ windage loss และ iron loss)

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ คือ สัดส่วนของกำลังงานที่มอเตอร์ส่งออกมาในรูปแรงบิดและความเร็วรอบเพลาส่งกำลังต่อกำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้โดยมอเตอร์ ซึ่งอยู่ในรูปแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

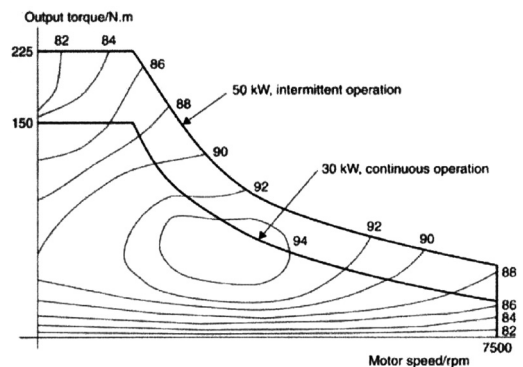
$$\eta_{motor} = \frac{\tau \omega}{V_m i} \quad (13)$$

หรือประสิทธิภาพของมอเตอร์อาจพิจารณาในรูปของแรงดันไฟฟ้า (V_m) และกระแสไฟฟ้า (i) ที่นำไปใช้ได้ (หลังจากการสูญเสียภายใน) ได้ดังสมการ

$$\eta_{motor} = \frac{(V_m - R_m i)(i - i_0)}{V_m i} \quad (14)$$

โดย i_0 คือ กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ขณะที่ไม่มี load และ $K_t = \tau / (i - i_0)$; $K_V = \omega / (V_m - R_m i)$ และ $K_t K_V = 1$

ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการทำงาน รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 1 ตัวอย่างประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน [4]

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านต้องการการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดอย่างถูกต้องตามจังหวะการหมุนของแม่เหล็กถาวรเพื่อสร้างแรงบิดในการหมุนอย่างต่อเนื่อง อุปกรณ์ควบคุมความเร็ว Electronic Speed Control (ESC) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านเพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตามสัญญาณควบคุม ผ่านการสลับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า การควบคุมความเร็วรอบผ่านอุปกรณ์ ESC อาจมองในรูปการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ($V_b \delta$) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถประมาณเบื้องต้นได้

$$\omega = K_V V_b \delta \quad (15)$$

โดย V_b คือแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับอุปกรณ์ ESC และ δ คือค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วรอบ (0-1)

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ESC อาจขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิ ค่าสัมประสิทธิ์ แรงบิดจาก load ของมอเตอร์ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ ESC และ switching frequency ของอุปกรณ์ ESC ซึ่งทำให้เกิดความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองและจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเชิงลึกจากผู้ผลิต

อัตราการสูญเสียพลังงานภายในอุปกรณ์ ESC อาจประมาณค่าได้จากความต้านทานภายใน (R_{ESC}) กระแสที่ไหลผ่าน และแรงดันไฟฟ้า [5] ตามสมการ

$$P_{ESC,loss} = R_{ESC}i^2 + A_E V_b i + B_E V_b + C_E V_b^2 \quad (16)$$

โดย A_E, B_E, C_E คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานจาก switching loss และ C_E คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานจากตัวเก็บประจุและ switching frequency ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงลึกของผลิตภัณฑ์ที่ผู้ผลิตไม่เปิดเผยโดยทั่วไป

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ESC อาจประมาณอย่างง่ายได้โดยการประมาณค่า switching loss เป็นสัดส่วนกับพลังงานที่อุปกรณ์ ESC ส่งให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า [6] ดังสมการ

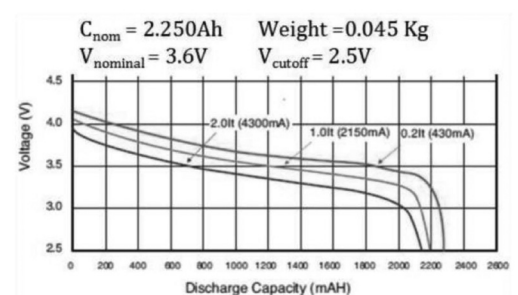
$$\eta_{ESC} = \frac{(V_b - R_{ESC}i - PTF(1-\delta))}{V_b} = \frac{V_m}{V_b} \quad (17)$$

โดย PTF คือ path throttle factor ซึ่งประมาณค่า switching loss เป็นสมการเชิงเส้น

2.3 ระบบแบตเตอรี่ (Battery System)

แบตเตอรี่ที่เป็นที่นิยมใช้งานกับอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด คือ แบตเตอรี่แบบ Lithium-ion (Li-ion, LIB) และแบตเตอรี่แบบ Lithium Polymer (LiPo) เนื่องจากมีอัตราการจ่ายพลังงานได้สูง มีขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพสูง และมีอัตราส่วนการเก็บกักพลังงานไฟฟ้าต่อน้ำหนักที่ดี เซลล์แบตเตอรี่แบบ LIB และ LiPo โดยทั่วไปแต่ละเซลล์มีแรงดันไฟฟ้าที่ระบุ (Nominal voltage) 3.6-3.7 โวลต์ เมื่อประจุไฟฟ้าเต็มจะมีแรงดันไฟฟ้า 4.2 โวลต์ และเมื่อมีการใช้งาน (Discharge) แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดสิ้นสุดการใช้งาน (Cutoff voltage) ที่ประมาณ 2.5-3.0 โวลต์ และในช่วงที่แบตเตอรี่ใกล้หมดนั้นแรงดันไฟฟ้า

จะมีการลดลงอย่างรวดเร็ว รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Discharge curve) และผลกระทบต่อความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่จากระดับการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (Rated capacity effect) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณพลังงานที่สามารถใช้ได้จากแบตเตอรี่มีค่าลดลงเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าในระดับที่สูงขึ้น



รูปที่ 2 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า

และความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และผลกระทบต่อความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่จากระดับการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน [7]

กฎของ Peukert เป็นหลักการที่นิยมในการใช้ประมาณการความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่หรือระยะเวลาที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ (t) สำหรับระดับการจ่ายกระแสไฟฟ้า (i) ดังสมการ

$$Q_p = i^k t \quad (18)$$

โดย Q_p คือ ปริมาณความจุไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าหนึ่งแอมป์ได้ต่อเนื่อง มีหน่วยเป็น แอมป์-ชั่วโมง (Peukert Capacity) และ $k > 1$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Peukert (สำหรับ LIB, $k \sim 0.99 - 1.09$ [8]) และปริมาณความจุไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด i ได้ต่อเนื่อง สามารถหาได้จากสมการ

$$Q_n = it = Q_p i^{1-k} = Q_b \left(\frac{Q_b}{iH} \right)^{k-1} \quad (19)$$

โดย H คือ rated discharge time ในหน่วยชั่วโมง และ Q_b คือ rated capacity สำหรับ H

ระบบแบตเตอรี่สำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดอาจประกอบไปด้วยเซลล์แบตเตอรี่จำนวน

หลายเซลล์เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและความจุของแบตเตอรี่ State-of-charge (SOC) ของแบตเตอรี่ คือ สถานะของประจุไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ โดย SOC=1 เมื่อแบตเตอรี่มีการประจุไฟฟ้าจนเต็ม และ SOC=0 เมื่อแบตเตอรี่ได้จ่ายกระแสไฟฟ้าออกไปจนหมด โดยการเปลี่ยนแปลงของ SOC อาจประมาณได้จากสมการ

$$SOC(t_1) = SOC(t_0) - i \Delta t / Q_n \quad (20)$$

ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ อาจประมาณได้จากการกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากความต้านทานภายในแบตเตอรี่ (R_b) ได้

$$\eta_{battery} = 1 - iR_b/V_b \quad (21)$$

และเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสถานะของประจุไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ แรงดันไฟฟ้าตาม Discharge curve [9] อาจประมาณได้ดังสมการ

$$V_b = V_0 - K_b \frac{Q_n}{Q_n - \int i dt} + A_b e^{-B_b \int i dt} - iR_b \quad (22)$$

โดย K_b คือ ค่าสัมประสิทธิ์ Polarization ของแบตเตอรี่ และพจน์ $A_b e^{-B_b \int i dt}$ แสดงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่มีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล ตัวแปรในสมการข้างต้น อาจประมาณค่าได้จากผลการทดสอบ Discharge curve ของแบตเตอรี่ได้จาก [10, 11]

$$A_b = V_{b,full} - V_{b,exp} \quad (23)$$

$$B_b = 2.3/Q_{exp} \quad (24)$$

$$K_b = 0.065 * [V_{b,full} - V_{b,nom} + A_b(e^{-B_b Q_{nom}} - 1)] \frac{Q_{full} - Q_{nom}}{Q_{nom}} \quad (25)$$

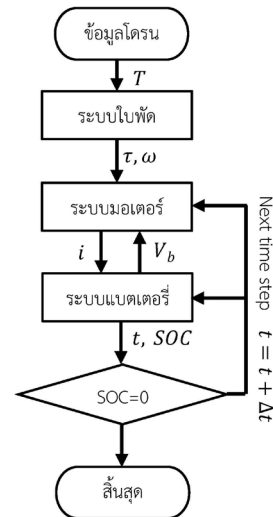
$$R_b = \frac{V_{b,nom}(1 - \eta_{battery})}{0.2Q_{nom}} \quad (26)$$

$$V_0 = V_{b,full} + K_b - A_b \quad (27)$$

2.4 การทำนายขีดความสามารถในการบินอยู่กับที่ (Hover performance prediction)

การทำนายขีดความสามารถในการบินอยู่กับที่ที่สามารถตั้งต้นได้จากน้ำหนักของโดรนและจำนวนชุดใบพัดที่ติดตั้ง แรงบิดและความเร็วรอบใบอาจประมาณค่า

ได้จากแรงขับร่วมกับคุณลักษณะเฉพาะของใบพัด และโดยทั่วไปแล้วชุดใบพัดและมอเตอร์ไฟฟ้าของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดจะไม่มีการใช้เฟืองทด ความเร็วรอบของมอเตอร์จึงมีค่าเท่ากับความเร็วรอบของใบพัด ($\omega = \Omega$) ดังนั้นปริมาณกระแสที่มอเตอร์ไฟฟ้าต้องการอาจประมาณค่าได้จากแรงบิดและความเร็วรอบของใบพัด แรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ไฟฟ้าและอุปกรณ์ ESC และหลังจากที่แบตเตอรี่มีการจ่ายพลังงานไฟฟ้า (ในรูปกระแสไฟฟ้า) ปริมาณพลังงานไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เหลืออยู่ อาจประมาณค่าได้จากขนาดของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นที่ออกจากแบตเตอรี่ และคุณลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่ ซึ่งการที่แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลดลงนี้จะส่งผลให้ระบบมอเตอร์ต้องการกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อรักษาแรงบิดและความเร็วรอบของใบพัดให้เท่าเดิมจนกระทั่งแบตเตอรี่ไม่เหลือพลังงานไฟฟ้าที่สามารถจ่ายได้ (SOC=0) หรือไม่สามารถจ่ายระดับกระแสไฟฟ้าที่ต้องการได้ ($i > i_{max}$) ดังนั้นระยะเวลาที่โดรนสามารถบินลอยนึ่งอยู่กับที่ได้จึงประมาณได้จากเวลารวมตั้งแต่แบตเตอรี่มีพลังงานเต็มจนกระทั่งพลังงานหมด ซึ่งจากสมการข้างต้น หากมีข้อมูลที่เพียงพอก็จะสามารถใช้การคำนวณเพื่อประมาณระยะเวลาในการบินลอยตัวของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดได้ ตามขั้นตอนในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการประมาณระยะเวลาในการบินลอยตัวอยู่กับที่ของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด

3. การวิเคราะห์ระบบโดรนที่มีในท้องตลาด

จากการสำรวจข้อมูลจากเว็บไซต์ของผู้จัดทำอากาศยานไร้คนขับปีกหมุนแบบหลายใบพัดที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานเดียว และมีน้ำหนักตั้งแต่ 25 กิโลกรัมขึ้นไป พบว่ามีการบอกข้อมูลคุณลักษณะโดยทั่วไป คือน้ำหนักรวมของอากาศยาน (W) จำนวนใบพัด (n) ขนาดและมุมของใบพัด ($R_r, \theta_{0.75}$) ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของมอเตอร์ (K_v) ชนิดและจำนวนเซลล์แบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าที่ระบุ ($S, V_{b,nom}$) ความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้า (i_{max}) ความจุไฟฟ้า (Q_b) และปริมาณและน้ำหนักของแบตเตอรี่ ข้อมูลเหล่านี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นในการทำนายขีดความสามารถในการบินลอยตัวของอากาศยาน และโดยทั่วไปแล้วผู้ผลิตโดรนแนะนำให้มีการสำรองความจุแบตเตอรี่ไว้ 15%-20% ขณะลงจอดเพื่อความปลอดภัยในการบินและรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

สำหรับใบพัดที่มีวางจำหน่ายในท้องตลาด โดยทั่วไปแล้วจะให้ข้อมูลพื้นฐานคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด และค่ามุมของใบพัด (Geometric pitch, GP) เว็บไซต์ของผู้ผลิตอาจเพิ่มเติมข้อมูลแรงขับรวมกับรอบการทำงานของใบพัดที่แนะนำให้ใช้ หรือผลการทดสอบใบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ ค่ามุม Geometric pitch ของใบพัดมีความสัมพันธ์กับมุมของใบพัดที่ภาคตัดขวาง (Cross section) ที่ระยะ 75% ของขนาดรัศมี [12] ดังสมการ

$$GP = 2\pi(0.75R_r) \tan \theta_{0.75} \quad (21)$$

โดย $\theta_{0.75}$ คือ มุมของใบพัดที่ภาคตัดขวางที่ระยะ 75% ของขนาดรัศมี และใบพัดที่ถูกออกแบบสำหรับการบินลอยนึ่ง มักจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ GP ประมาณ $1/3$ เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ($GP \sim 2R_r/3$) [13]

ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านและอุปกรณ์ควบคุมความเร็วที่มีวางจำหน่ายในท้องตลาด โดยทั่วไป จะให้ข้อมูลพื้นฐานการใช้งานคือขนาดแรงดันไฟฟ้าที่แนะนำ ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว (KV rating) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่อุปกรณ์รองรับได้ และในบางที่ผู้จัดทำอาจมีข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ขณะไม่มี load และความต้านทานไฟฟ้าภายในมอเตอร์

ระบบแบตเตอรี่สำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดที่มีวางจำหน่ายในท้องตลาด โดยทั่วไปให้ข้อมูลพื้นฐานในการใช้งาน อาทิ น้ำหนัก ปริมาตร ความจุไฟฟ้าในรูปปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อชั่วโมง ความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้า (Discharge rating) จำนวนเซลล์ไฟฟ้าภายในแรงดันไฟฟ้าที่ระบุ Nominal voltage (หรือ Operating voltage) และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถใช้งานได้โดยความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้า 1C แสดงความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดในแบตเตอรี่ด้วยกระแสไฟฟ้าขนาดคงที่ได้ในเวลาหนึ่งชั่วโมง และ 2C แสดงความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดด้วยกระแสไฟฟ้าขนาดคงที่ได้ในเวลาครึ่งชั่วโมง และมีผู้ผลิตเพียงส่วนน้อยที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับความต้านทานไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ หรือปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการระบุความจุไฟฟ้า

สำหรับระบบใบพัดและระบบมอเตอร์ไฟฟ้าของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด ผลการทดสอบมักจะอยู่ในรูปชุดข้อมูลที่ได้จากการจับคู่ใบพัดและมอเตอร์ไฟฟ้ารวมถึงอุปกรณ์ ESC และทดสอบการทำงานในขณะที่อยู่กับที่ (Static test) โดยการวัดกำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ ความเร็วรอบใบพัด และแรงขับที่ใบพัดสร้าง และบางกรณีอาจมีผลการวัดแรงบิดที่เพลาส่งกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าด้วย ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างชุดข้อมูลการทดสอบระบบใบพัดและมอเตอร์ที่เปิดเผยโดยผู้ผลิต

ตารางที่ 1 ตัวอย่างผลการทดสอบระบบใบพัดขนาด 41x13.5 นิ้ว ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้า BLDC rating 95Kv สำหรับแบตเตอรี่ 18 เซลล์ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 70 โวลต์ ที่อุณหภูมิอากาศ 25°C ที่ระดับน้ำทะเล จำนวน 23 ชุดข้อมูลที่เปิดเผยจากผู้ผลิต [14]

แรงขับ [กรัม, g]	กระแส [แอมป์]	กำลังไฟฟ้า [วัตต์, W]	ความเร็ว [RPM]	ประสิทธิภาพ [g/W]
8760	12.4	854.8	1956	10.2
9560	14.1	973.5	2044	9.8
10455	16.1	1113.4	2138	9.4
11420	18.4	1271.7	2235	9
12330	20.7	1427.3	2323	8.6

ตารางที่ 1 ตัวอย่างผลการทดสอบระบบใบพัดขนาด 41x13.5 นิ้ว ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้า BLDC rating 95Kv สำหรับแบตเตอรี่ 18 เซลล์ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ 70 โวลท์ ที่อุณหภูมิอากาศ 25°C ที่ระดับน้ำทะเล จำนวน 23 ชุดข้อมูล ที่เปิดเผยจากผู้ผลิต [14]

แรงขับ [กรัม, g]	กระแส [แอมป์]	กำลังไฟฟ้า [วัตต์, W]	ความเร็ว [RPM]	ประสิทธิภาพ [g/W]
13065	22.5	1557	2391	8.4
14300	25.8	1782.6	2499	8
15300	28.5	1972.1	2583	7.8
16420	31.7	2191.3	2673	7.5
17720	35.5	2455.5	2773	7.2
18730	38.6	2668.4	2848	7
19675	41.6	2874.3	2918	6.8
20785	45.2	3125.2	2998	6.7
22160	50	3451.4	3096	6.4
23030	53.1	3667.6	3158	6.3
23960	56.6	3908.4	3224	6.1
25400	62.3	4302.9	3327	5.9
26670	67.7	4675.6	3418	5.7
27045	69.4	4790.5	3444	5.6
28290	75.2	5189.7	3532	5.5

ชุดข้อมูลการทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลการทดสอบใบพัดและมอเตอร์ที่เปิดเผยทางเว็บไซต์ของผู้ผลิตและผู้จัดจำหน่าย จำนวน 22 คู่ ใช้แรงดันไฟฟ้า 24-70 โวลท์ (8S-18S) จำนวนชุดข้อมูลการทดสอบรวม 300 ชุดข้อมูล จากหลายแหล่งที่มาเพื่อให้สามารถวิเคราะห์หาค่ากลางและค่าสูงสุดที่ใช้เป็นตัวแทนของประสิทธิภาพของระบบใบพัดและมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดที่มีจัดจำหน่ายในปัจจุบันได้ และสามารถนำไปใช้ทำนายอัตราการใช้พลังงานของระบบใบพัดและมอเตอร์อื่น ๆ ได้ต่อไป ตารางที่ 2 แสดงคุณลักษณะทั่วไปของใบพัดและมอเตอร์ไฟฟ้าที่นำชุดข้อมูลการทดสอบมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยข้อมูลการทดสอบของแต่ละคู่ ประกอบด้วยข้อมูลผลการทดสอบจำนวน 5-25 จุดการทดสอบ (ชุดข้อมูล) จากการวิเคราะห์พบว่าข้อมูลการทดสอบใบพัดที่ความเร็วรอบต่ำมีสัดส่วน

ความแปรปรวนสูงกว่าข้อมูลการทดสอบที่ความเร็วรอบสูง ความแปรปรวนนี้อาจเกิดได้จากอุปกรณ์และกระบวนการทดสอบของผู้ผลิต และเพื่อเป็นการลดความแปรปรวนการวิเคราะห์ให้ข้อมูลการทดสอบที่มีความเร็วรอบสูงกว่า 35% ของความเร็วรอบสูงสุดในการทดสอบเท่านั้น

ตารางที่ 2 คุณลักษณะเฉพาะของใบพัดและมอเตอร์ที่เก็บรวบรวมข้อมูลการทดสอบมาใช้

ใบพัด [นิ้วนิ้ว]	มอเตอร์ Kv-rating [RPM/V]	ใบพัด [นิ้วนิ้ว]	มอเตอร์ Kv-rating [RPM/V]
22x6.6	300	36.2x11.8	110
24x7.2	300	40x13.1	100
27x8.8	150	40x13.1	80
28x9.2	150	40x10	80
30.4x10.9	100	41x13.5	95
32x10.5	95	43x14	85
32.2x10.5	85	43x14	95
34x14	110	48x17.5	60
34.7x11	110	56x20	60
36x19	100	56x20	45
36x12	110	63x24	45

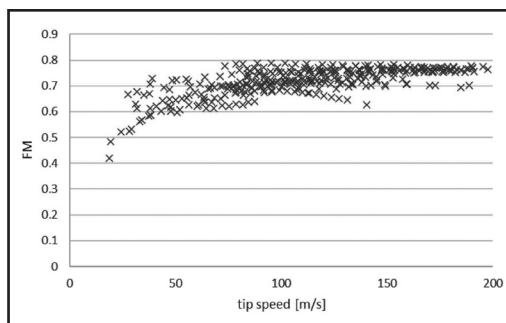
ในส่วนระบบแบตเตอรี่สำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด จากการสำรวจข้อมูลจากผู้ผลิตและผู้จัดจำหน่าย พบข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่และแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ หรือผลการทดสอบการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่แต่ละแบบได้น้อยมาก เอกสารข้อมูลของแบตเตอรี่ (Battery data sheet) อาจระบุข้อมูลข้อมูลการทดสอบความจุ (rated capacity) ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 0.2C ตามมาตรฐาน International Electrotechnical Commission (IEC) และข้อมูลความต้านทานไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ ข้อมูลแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่และแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่สำหรับ LIB และ LiPo อาจพบได้จากผู้ผลิตและผู้จัดจำหน่ายแบตเตอรี่สำหรับด้านอื่นๆ ตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่และแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบ LiPo โดยทั่วไป

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่และแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบ LiPo โดยทั่วไป [15]

Capacity %	1S	2S	3S	4S	5S	6S
100	4.2	8.4	12.6	16.8	21	25.2
95	4.15	8.3	12.45	16.6	20.75	24.9
90	4.11	8.22	12.33	16.45	20.56	24.67
85	4.08	8.16	12.25	16.33	20.41	24.49
80	4.02	8.05	12.07	16.09	20.11	24.14
75	3.98	7.97	11.95	15.93	19.92	23.9
70	3.95	7.91	11.86	15.81	19.77	23.72
65	3.91	7.83	11.74	15.66	19.57	23.48
60	3.87	7.75	11.62	15.5	19.37	23.25
55	3.85	7.71	11.56	15.42	19.27	23.13
50	3.84	7.67	11.51	15.34	19.18	23.01
45	3.82	7.63	11.45	15.26	19.08	22.89
40	3.8	7.59	11.39	15.18	18.98	22.77
35	3.79	7.57	11.36	15.14	18.93	22.72
30	3.77	7.53	11.3	15.06	18.83	22.6
25	3.75	7.49	11.24	14.99	18.73	22.48
20	3.73	7.45	11.18	14.91	18.63	22.36
15	3.71	7.41	11.12	14.83	18.54	22.24
10	3.69	7.37	11.06	14.75	18.44	22.12
5	3.61	7.22	10.83	14.43	18.04	21.65
0	3.27	6.55	9.82	13.09	16.37	19.64

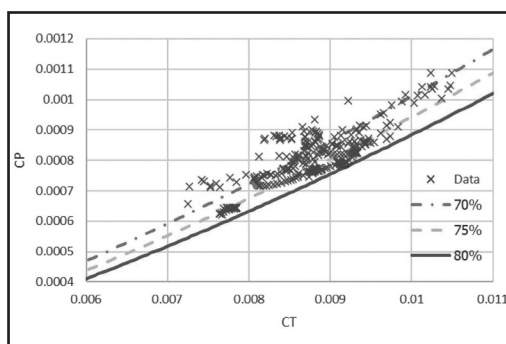
3.1 การวิเคราะห์ระบบใบพัดที่มีในท้องตลาด

การวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบใบพัดมีเป้าหมายในการหาความเป็นไปได้ในการทำนายแรงบิด (τ) และความเร็วรอบ (ω) ของใบพัดจากข้อมูลเบื้องต้น คือ แรงขับจากใบพัด และขนาดและมุมของใบพัด (คุณลักษณะเฉพาะตัวของใบพัด) รูปที่ 4 แสดงค่าประสิทธิภาพของใบพัดที่ความเร็วที่ปลายใบพัดต่าง ๆ จากชุดข้อมูลการทดสอบ โดยค่าประสิทธิภาพที่สูงที่สุดมีค่า $FM_{max} = 0.789$ จากรูปอาจเห็นถึงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วปลายใบของใบพัดได้ และเห็นได้ว่าใบพัดแต่ละแบบมีความเร็วรอบเฉพาะที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด



รูปที่ 4 ค่าประสิทธิภาพของใบพัดและความเร็วที่ปลายใบพัดของแต่ละชุดข้อมูล

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงขับและกำลังงานที่ต้องการของใบพัดจากชุดข้อมูลเทียบกับเส้นอ้างอิงค่าประสิทธิภาพที่ 70% 75% และ 80% จากรูปพบว่าค่ากลางของประสิทธิภาพ $FM_{average} = 0.723$

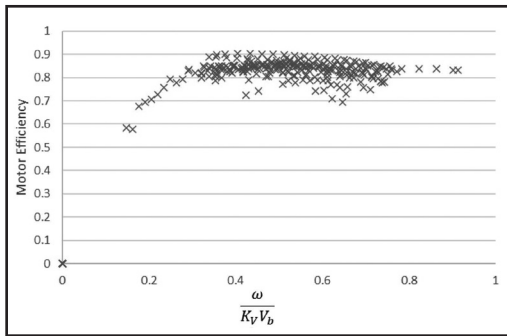


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการสร้างแรงและกำลังงานที่ใช้ของใบพัด

จากการวิเคราะห์ชุดข้อมูล พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมุมของใบพัดกับสัมประสิทธิ์แรงขับอยู่ในระดับต่ำ ($R^2 < 0.1$) ซึ่งค่อนข้างคลาดเคลื่อนไปจากความสัมพันธ์ทางทฤษฎี (Blade Element Theory) ทำให้เห็นได้ถึงลักษณะเฉพาะตัวของใบพัดจากการออกแบบและการระบุขนาดมุมของใบพัดจากผู้ผลิต

3.2 การวิเคราะห์ระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านที่มีในท้องตลาด

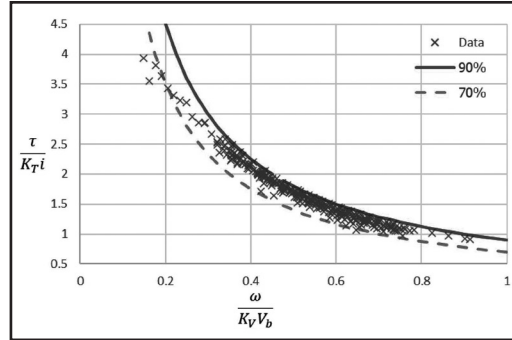
รูปที่ 6 แสดงค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าที่สัดส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วรอบสูงสุดทางทฤษฎี จากชุดข้อมูลการทดสอบ โดยมีค่าประสิทธิภาพที่สูงสุดเท่ากับ 0.9028 จากรูปอาจเห็นถึงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและสัดส่วนความเร็วของมอเตอร์ได้ และเห็นได้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้ามีช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วง 0.4-0.6 ของความเร็วรอบสูงสุดทางทฤษฎี โดยจากการวิเคราะห์ชุดข้อมูลการทดสอบที่มีพบว่าไม่สามารถแยกประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ESC ออกจากกันได้



รูปที่ 6 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ BLDC

ที่สัดส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วรอบสูงสุดทางทฤษฎี

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงบิดต่อแรงบิดทางทฤษฎีและสัดส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วรอบสูงสุดทางทฤษฎี เทียบกับเส้นอ้างอิงค่าประสิทธิภาพที่ 70% และ 90% จากรูปอาจเห็นได้ถึงเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนทั้งสองได้ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการประมาณค่าขนาดกระแสไฟฟ้าที่ระบบมอเตอร์ไฟฟ้าต้องการจากข้อมูลเบื้องต้น คือแรงบิด ความเร็วรอบ และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของมอเตอร์แสดงคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ โดยใช้เส้นแนวโน้มของข้อมูลดังรูปที่ 7 ได้

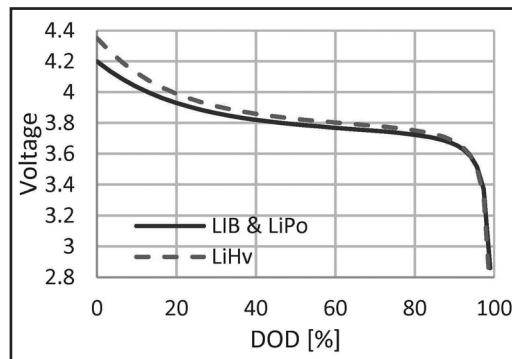


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนแรงบิดและสัดส่วนความเร็วรอบต่อความเร็วรอบสูงสุดทางทฤษฎี

3.3 การวิเคราะห์ระบบแบตเตอรี่ที่มีในท้องตลาด

เนื่องจากข้อมูลการทดสอบแบตเตอรี่ที่พบจากผู้ผลิตมีจำกัด คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แบตเตอรี่แต่ละเซลล์อาจถูกวิเคราะห์จากข้อมูลการทดสอบโดยอ้างอิงช่วงการใช้งานของเซลล์แบตเตอรี่แบบ LIB และ LiPo (0% – 100% ~2.75V – 4.2V) และช่วงการใช้งานของเซลล์แบตเตอรี่แบบ Lithium Polymer High Voltage (LiHv) อยู่ที่ (0% – 100% ~2.9V – 4.35V)

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ (DOD-1-SOC) และแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ได้จากการประมาณค่า



รูปที่ 8 Discharge curve จากการประมาณค่า

4. การพัฒนาแบบจำลองการทำงานยัดความสามารถในการบินอยู่กับที่

การทำนายแรงบิดและความเร็วรอบของใบพัดจากข้อมูลเบื้องต้น คือ แรงขับจากใบพัด และขนาดและมุมของใบพัด โดยตรงจำเป็นต้องใช้สมการประมาณค่า

ที่ซับซ้อน ในการศึกษานี้ข้อมูลเบื้องต้นจะถูกใช้เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงขับซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของใบพัดก่อนสมการพหุนามอาจถูกใช้เพื่อหาค่าประมาณของสัมประสิทธิ์แรงขับจากข้อมูลเบื้องต้นดังสมการ

$$C_T = A_1 + B_1 \frac{1}{R_r} + C_1 \frac{\theta_{0.75}}{R_r} + f_1(T, R_r, \theta_{0.75}) \quad (29)$$

โดย A_1, B_1, C_1 คือ ค่าคงที่ในสมการประมาณค่า และ f_1 คือ สมการพหุนามสำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงขับเพื่อปรับปรุงตามชุดข้อมูลการทดสอบ ซึ่งค่าคงที่ของสมการพหุนามอาจหาค่าได้จากชุดข้อมูลการทดสอบด้วยวิธี least-square

จากค่าสัมประสิทธิ์แรงขับ ความเร็วรอบและแรงบิดของใบพัด สามารถหาค่าได้จากสมการ

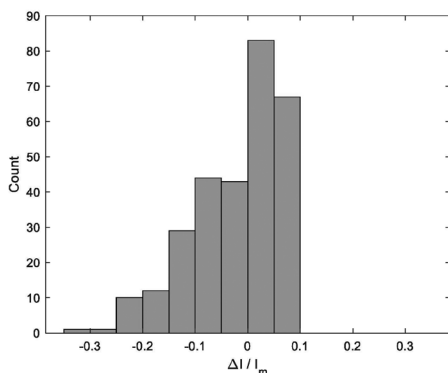
$$\omega = \sqrt{\frac{\tau}{C_T \rho \pi R_r^4}}, \tau = \frac{1}{FM} \sqrt{\frac{T^3}{2 \rho \pi R_r^2}} \quad (30)$$

โดย $FM \sim FM_{average}$

การทำนายขนาดกระแสไฟฟ้าที่ระบบมอเตอร์ต้องการจากข้อมูลเบื้องต้น คือ แรงบิดและความเร็วรอบของใบพัด แรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า สามารถทำได้โดยทำนายสัดส่วนแรงบิดจากสัดส่วนความเร็วรอบในรูปแบบดังสมการ

$$\hat{t} = \frac{\tau}{K_t i} = f_2 \left(\frac{\omega}{K_v V_b} \right) = A_2 + B_2 \left(\frac{\omega}{K_v V_b} \right)^{C_2} \quad (30)$$

โดย f_2 คือ สมการพหุนามสำหรับการประมาณค่า และ A_2, B_2, C_2 คือ ค่าคงที่ในสมการประมาณค่า จากนั้นจึงคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าจาก $i = \tau / K_t \hat{t}$



รูปที่ 9 ความผิดพลาดจากการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าจากชุดข้อมูลการทดสอบ

รูปที่ 9 แสดงความผิดพลาดจากการประมาณค่ากระแสไฟฟ้าโดยใช้ชุดข้อมูลการทดสอบ จากรูปพบว่า มีผลการทำนายขนาดกระแสไฟฟ้ามีความผิดพลาดในช่วง $\pm 5\%$ เป็นจำนวน 43.5% ของจำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด และมีความผิดพลาดในช่วง $\pm 10\%$ เป็นจำนวน 81.9% ของจำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด โดยมีค่า Root Mean Square Error เท่ากับ 8.59%

คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แบตเตอรี่อาจประมาณค่าได้จากความจุไฟฟ้าที่ระบุ (Rating Capacity) และจำนวนเซลล์แบตเตอรี่ ดังสมการที่ (19) เพื่อใช้หาการเปลี่ยนแปลงของ SOC หลังจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ (20) และหาแรงดันไฟฟ้าคงเหลือจากสมการที่ (22) แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เป็นผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากเซลล์แบตเตอรี่คูณกับจำนวนเซลล์ภายในแบตเตอรี่

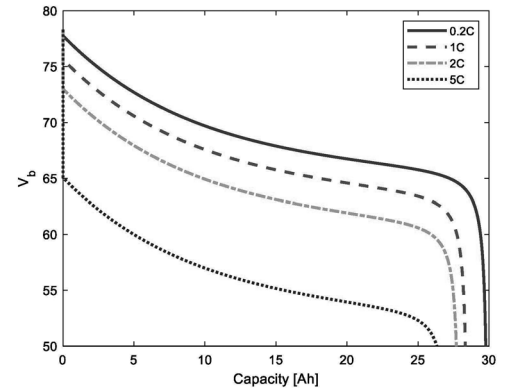
การทดสอบการทำนายขีดความสามารถในการบินอยู่กับที่ของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด ทำโดยใช้ข้อมูลอากาศยานที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดจากผู้จัดจำหน่ายและการทำนายขีดความสามารถในการบินอยู่กับที่จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยรูปที่ 10-11 แสดงผลในการประมาณค่าจากแบบจำลอง รูปที่ 10 แสดงการประมาณค่า Discharge curve ของแบตเตอรี่ LiPo High-Voltage ขนาด 18S ความจุไฟฟ้า 30 แอมป์-ชั่วโมง (Ah) สำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าระดับต่าง ๆ กัน โดยอ้างอิง Discharge curve ของเซลล์แบตเตอรี่ตามรูปที่ 8

รูปที่ 11 แสดงผลการประมาณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า และ SOC ของแบตเตอรี่ที่อากาศยานไร้คนขับที่ไม่มีส้อมภาระ (ตามตารางที่ 4) ใช้ในการบินลอยนิ่งอยู่กับที่ จากรูปพบว่าแบตเตอรี่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่วง 2C-3C หากพิจารณากรณีนี้ทำการบินด้วยพลังงานในแบตเตอรี่ทั้งหมด (SOC=0) สามารถทำนายระยะเวลาสูงสุดได้ 22.06 นาที หากพิจารณากรณีนี้ทำการบินจนกระทั่งเหลือพลังงานในแบตเตอรี่ 20% (SOC = 0.2) สามารถทำนายระยะเวลาบินได้ 18.21 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับระยะเวลาบินที่ผู้ผลิตแนะนำที่ 17.5 นาที (อ้างอิงตามคำแนะนำในการใช้งานอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดของผู้ผลิตที่ให้ลงจอดเมื่อพลังงานในแบตเตอรี่เหลือน้อยกว่า 20%) โดยมีความผิดพลาดในการทำนาย 4% จากการใช้อำนาจสัมประสิทธิ์ของ Peukert เท่ากับ 1.03 และค่าประสิทธิภาพ

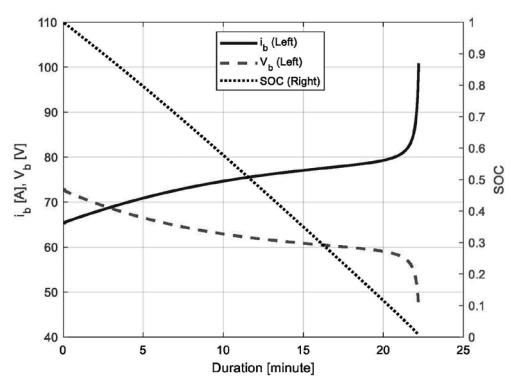
ของแบตเตอรี่ ($\eta_{battery}$) เท่ากับ 99.6% และไม่ได้คำนึงถึง การสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นได้จากปัจจัย อาทิ การสูญเสีย พลังงานจากการควบคุม การสูญเสียพลังงานในระบบไฟฟ้า การสูญเสียจากแรงต้านอากาศของโครงสร้าง เป็นต้น หากพิจารณากรณีที่ทำการบินโดยมีสัมภาระบรรทุกน้ำหนัก 20 กก. สามารถทำนายระยะเวลาบิน (SOC=0.2) ได้ 10.18 นาที และหากทำการเพิ่มจำนวนแบตเตอรี่ขึ้นอีก 1 ก้อน และ 2 ก้อน สามารถทำนายระยะเวลาการบินเพิ่มได้ เป็น 16.48 นาที และ 20 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ข้อมูลคุณลักษณะทั่วไปจากผู้จัดทำหน่วยอากาศยาน ไร้คนขับแบบหลายใบพัด และการทำนายขีดความสามารถ ในการบินอยู่กับที่จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

คุณลักษณะทั่วไป	ค่าระบุ
น้ำหนักอากาศยานรวม [กิโลกรัม]	51.4
น้ำหนักบรรทุกสูงสุด [กิโลกรัม]	50
จำนวนใบพัด 56x20	4
แบตเตอรี่ LiPo High-Voltage	18S
ความจุไฟฟ้า [Ah]	30
ความสามารถในการจ่ายกระแส	25C
น้ำหนักแบตเตอรี่ [กิโลกรัม]	13.5
ขนาดใบพัด	56x20
สัมประสิทธิ์ความเร็วของมอเตอร์	45Kv
ระยะเวลาบินลำเปล่าที่แนะนำ [นาที]	17.5
ทำนายระยะเวลาบินถึง SOC=0.2	18.21
ทำนายประมาณระยะเวลาบินสูงสุด	22.06



รูปที่ 10 การประมาณค่า Discharge curve ของแบตเตอรี่ LiPo High-Voltage 18S ความจุไฟฟ้า 30 Ah



รูปที่ 11 ผลการประมาณค่าความดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า จากแบตเตอรี่ที่อากาศยานไร้คนขับในการทดสอบใช้ ในการบินลอยนึ่งอยู่กับที่

5. บทสรุปและข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

บทความนี้ได้นำเสนอกระบวนการพัฒนาแบบจำลองทั่วไปเพื่อทำนายขีดความสามารถในการบินอยู่กับที่ของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดที่มีน้ำหนักมากกว่า 25 กิโลกรัม จากข้อมูลเบื้องต้น อาทิ น้ำหนักรวมของอากาศยาน จำนวนใบพัด ขนาดและมุมของใบพัด ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็วของมอเตอร์ ชนิดและจำนวนเซลล์แบตเตอรี่ และความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ โดยการวิเคราะห์หาค่ากลางคุณลักษณะเฉพาะของระบบใบพัด มอเตอร์ไฟฟ้า และแบตเตอรี่ โดยแบบจำลองทั่วไปนี้สามารถใช้ในการทำนายระยะเวลาในการบินนิ่งอยู่กับที่ของอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัด ที่มีน้ำหนักมากกว่า 25 กก. เบื้องต้นได้ ในกรณีที่มีข้อมูลจำกัดได้ และสามารถปรับใช้กระบวนการเพื่อทำให้ได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำในการทำนายมากยิ่งขึ้นหากเข้าถึงข้อมูลเฉพาะของระบบย่อยได้ โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้สำหรับการวิเคราะห์เพื่อเลือกใช้งานอากาศยานไร้คนขับแบบหลายใบพัดหรือการปรับแต่งระบบย่อยภายในให้มีเหมาะสมกับภารกิจ รวมทั้งสามารถนำไปใช้สำหรับการวางแผนภารกิจที่เกี่ยวข้องต่อไป

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Anderson, J.D., Aircraft Performance and Design, McGraw-Hill, New York, 1999.
- [2] Gaurav Nanda and Narayan C. Kar. "A Survey and Comparison of Characteristics of Motor Drives Used in Electric Vehicles". Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2006.
- [3] S. Rambabu, "Modeling and Control of a Brushless DC Motor," M.S. thesis, Dept. of Electrical Engineering, NIT Rourkela, Odisha, India, 2007.
- [4] C. C. Chan, "Present status and future trends of electric vehicles," 1993 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-93., Hong Kong, 1993, pp. 456-469 vol.1.
- [5] Prohelion. "WaveSculptor 22 Motor Controller User' s Manual." prohelion.com. https://docs.prohelion.com/Motor_Controllers/WaveSculptor22/User_Manual/Cooling.html (accessed Sep. 1, 2025).
- [6] A. Gong and D. Verstraete, "Development of a dynamic propulsion model for electric UAVs," 7th Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Cairns, Australia, 25-27 November 2015.
- [7] Y. Chen, E. Macii and M. Poncino, "Frequency domain characterization of batteries for the design of energy storage subsystems," 2016 IFIP/ IEEE International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), Tallinn, Estonia, 2016, pp. 1-6.
- [8] N. Omar, P. V. D. Bossche, T. Coosemans, and J. V. Mierlo, "Peukert Revisited—Critical Appraisal and Need for Modification for Lithium-Ion Batteries", Energies, Vol 6, No. 11, pp.5625-5641. 2013.
- [9] O. Tremblay and L.A. Dessaint, "Experimental validation of a battery dynamic model," World Electr Veh J. 3. 1-10. 2009.
- [10] A. Foles, L. Fialho, P. Horta, M. Collares-Pereira, "Validation of a lithium-ion commercial battery pack model using experimental data for stationary energy management application," Open Res Eur, 2022 Jun 10;2:15.
- [11] E. Raszmann, K. Baker, Y. Shi, and D. Christensen, "Modeling Stationary Lithium-Ion Batteries for Optimization and Predictive Control," in the IEEE Power and Energy Conference, Champaign, Illinois, USA, February 23-24, 2017.
- [12] Aviation Maintenance Technician Handbook – Powerplant, FAA-H-8083-32B, Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation, 2023
- [13] J Susi, K. E. Unt, S Heering, "The Efficiency of Drone Propellers—A Relevant Step Towards Sustainability," Engineering Proceedings. 2025; 90(1):89.
- [14] Hobbywing. "HW-X11-18S Technical Parameters." hobbywing.com. [https:// www.hobbywing.com/en/products/xrotor-x11-14s--18s114](https://www.hobbywing.com/en/products/xrotor-x11-14s--18s114) (accessed Sep. 1, 2025).
- [15] Ufine. "Useful Overview of Lipo Battery Voltage." ufinebattery.com. <https://www.ufinebattery.com/blog/useful-overview-of-lipo-battery-voltage/>

การวัดเทียบศักยภาพด้านการรบและอุตสาหกรรม: กรณีศึกษาโครงการพัฒนาจรวดภายในประเทศของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

บดินทร์ สันทัด^{1*}

วันที่รับ 3 กรกฎาคม 2568 วันที่แก้ไข 30 กรกฎาคม 2568 วันตอบรับ 25 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาขีดความสามารถด้านการรบและศักยภาพทางอุตสาหกรรมของโครงการพัฒนาจรวดในประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และประเมินผลกระทบเชิงยุทธศาสตร์ต่อความมั่นคงในระดับภูมิภาค รวมทั้งเสนอแนวทางการรับมือและการพัฒนาของประเทศไทยด้วย การศึกษาใช้กรอบวิเคราะห์ "แกน X และ Y" ในสองมิติ ซึ่งวัดขีดความสามารถด้านการรบจากองค์ประกอบ 5 ประการ ได้แก่ ระยะเวลา ความแม่นยำ ความคล่องตัว และการยิงต่อเนื่อง และขีดความสามารถทางอุตสาหกรรมโดยใช้แนวคิด "บันไดการผลิต" เพื่อสะท้อนระดับความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ การวิเคราะห์นี้ได้จัดทำฉากทัศน์ของโครงการจรวดออกเป็น 4 ฉากทัศน์ ได้แก่ โครงการที่เป็นภัยคุกคามยุทธศาสตร์สูงสุด โครงการพัฒนาได้ไม่เต็มที่ โครงการที่พึ่งพาเทคโนโลยีต่างชาติ และโครงการความเสี่ยงต่ำ พร้อมเสนอแนวทางการรับมือในแต่ละกรณี ผลการวิเคราะห์พบว่าโครงการพัฒนาจรวดในประเทศเหล่านี้บางโครงการส่งผลกระทบต่อความมั่นคงและการพัฒนาอุตสาหกรรมในภูมิภาค เช่น โครงการจรวด R-Han 122 ของอินโดนีเซีย และโครงการจรวด Blue Spear ของสิงคโปร์ ที่สะท้อนถึงศักยภาพการพัฒนาภายในประเทศในระดับสูง ซึ่งอาจก่อให้เกิดภัยคุกคามในกรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่างประเทศมีปัญหา ขณะที่โครงการที่พึ่งพาเทคโนโลยีต่างชาติ หรือโครงการที่ยังพัฒนาได้ไม่เต็มที่ ยังคงมีข้อจำกัดในการพึ่งพาตนเอง แต่ยังสามารถสร้างผลกระทบเชิงยุทธศาสตร์ได้ในหลายมิติ ผลการศึกษาชี้ว่า ประเทศไทยควรประเมินโครงการเหล่านี้ในมิติที่กว้างกว่าแค่การตอบสนองภัยคุกคามทางทหาร เช่น การสร้างพันธมิตรเชิงยุทธศาสตร์ การร่วมมือพัฒนากับอินโดนีเซีย หรือการรับถ่ายทอดเทคโนโลยีจากสิงคโปร์และอิสราเอล เพื่อเสริมสร้างศักยภาพเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม การพัฒนาระบบป้องกันภัยทางอากาศ หรือการโจมตีทางไซเบอร์อาจเป็นแนวทางสร้างดุลอำนาจในภูมิภาคได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้ไม่ได้มองโครงการพัฒนาจรวดเป็นเพียงภัยคุกคามทางทหาร แต่ยังเป็นโอกาสในการส่งเสริมเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม และบทบาทของไทยในภูมิภาค โดยเน้นการสร้างพันธมิตรและลดความตึงเครียดระหว่างประเทศ พร้อมกำหนดนโยบายที่ตอบสนองต่อความท้าทายอย่างรอบด้าน

คำสำคัญ: การวัดเทียบศักยภาพ, ขีดความสามารถด้านการรบ, อุตสาหกรรมป้องกันประเทศ, การพัฒนาจรวด

¹ ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: bodin.s@dti.or.th

Benchmarking the Combat and Industrial Capabilities: A Case Study of Indigenous Rocket Development Projects in the Southeast Asian Region

Bodin Suntud^{1*}

Received 3 July 2025 Revised 30 July 2025 Accepted 25 August 2025

Abstract

The objective of this research is to examine the combat capabilities and industrial potentials of rocket development projects in Southeast Asian countries, to assess their strategic impacts on regional security and to provide recommendations for coping with the situation and developing our capability. Using the "X and Y Axes" analytical framework, the study evaluates combat capabilities across five factors: range, warhead, accuracy, mobility, and salvo capability, alongside industrial capabilities through the "Ladder of Production" concept, which reflects the progression of defense industries. The analysis categorizes rocket development projects into four scenarios: projects with the highest strategic threats, underdeveloped projects, projects dependent on foreign technology, and low-risk projects, while proposing appropriate response strategies for each case. The findings indicate that some rocket development projects, such as the Indonesia's missile project called R-Han 122 and the Singapore's missile project called Blue Spear, significantly impact regional security and industrial development. These projects demonstrate advanced domestic development capabilities that could pose threats if international relations deteriorate. Meanwhile, projects reliant on foreign technology or those that remain underdeveloped still exhibit strategic impacts, albeit with limited self-reliance. The study highlights that Thailand should assess these projects beyond mere military threat responses, emphasizing broader dimensions such as strategic alliances, joint development with Indonesia, and technology transfers from Singapore and Israel to enhance economic and industrial capacities. Advanced air defense systems and proactive measures, including cyber operations, may also serve to balance regional power effectively. Thus, this research reframes rocket development projects not only as military threats but also as opportunities to enhance Thailand's economy, industry, and regional influence. It underscores the importance of building alliances, reducing international tensions, and implementing policies that address challenges comprehensively and sustainably.

Keywords: Capability Benchmarking, Combat Capability, Defence Industry, Rocket Development

¹ Defence Technology Analysis Department, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: bodin.s@dti.or.th

1. บทนำ

ภายใต้สภาวะบริบทโลกที่มีความท้าทายด้านความมั่นคงระหว่างประเทศ ทั้งระดับโลกและภูมิภาค การแข่งขันในรูปแบบสงครามเย็นมีความเข้มข้นมากขึ้น จากที่ผ่านมา รัฐต่าง ๆ ที่ไม่มีพื้นฐานความเชื่อมั่นระหว่างกัน มักหาทางออกด้วยการพัฒนาเครื่องมือทางการเมืองในการใช้กำลังที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ผ่านการพัฒนากองทัพอย่างต่อเนื่องด้วยวิธีการต่าง ๆ จนนำไปสู่การแข่งขันสะสมอาวุธหรือ (Arms Race)¹ การได้มาซึ่งอาวุธก็มีหลากหลายวิธีการ² และกองทัพก็แสวงหาอาวุธหลากหลายประเภท³ โดยแต่ละประเทศประเมินว่าได้ดำเนินการไปเพื่อวัตถุประสงค์ด้านความมั่นคงแห่งชาติ แต่เมื่อกระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในรูปแบบที่แข่งขันกัน สถานการณ์ได้สร้างให้เกิดความหวาดระแวงในขีดความสามารถและเจตนาพันธมิตรระหว่างรัฐ จนเกิดความไม่มั่นคงระหว่างประเทศขึ้น ถือว่าสร้างปรากฏการณ์ด้านความสัมพันธ์ระหว่างประเทศที่เรียกว่า Security

Dilemma อันเป็นที่รับรู้กันทั่วไป ทั้งนี้ กรณีศึกษานี้ได้กำหนดขอบเขตการศึกษาเฉพาะเรื่องการพัฒนาโครงการจรวดที่ได้มาจากความร่วมมือทางอุตสาหกรรมหรือการพัฒนาบ่ออาวุธของประเทศภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เท่านั้น ไม่นับรวมถึงโครงการจรวดที่แต่ละประเทศนำเข้าจากต่างประเทศมาเข้าประจำการ เพราะการสร้างความร่วมมือทางอุตสาหกรรมกับประเทศเจ้าของเทคโนโลยี และการพัฒนาด้วยตนเองหรือเป็นวิธีที่ยั่งยืนและรักษาศักยภาพ ขีดความสามารถและอำนาจกำลังรบอย่างอิสระมากที่สุด ในวิธีการทั้งหมด และสามารถเป็นภัยคุกคามได้มากที่สุดด้วย งานวิจัยนี้จึงเลือกเฉพาะวิธีการดังกล่าวมาเป็นกรณีศึกษา

บทความวิชาการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1. ต้องการศึกษาขีดความสามารถด้านการรบและศักยภาพทางอุตสาหกรรมของโครงการพัฒนาจรวดของประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ 2. ประเมินผลกระทบเชิงยุทธศาสตร์ที่อาจเกิดขึ้นจากการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าว ทั้งในแง่ของความมั่นคงระดับ

¹ น.ต.ร.บดินทร์ สันทัด, “ปรากฏการณ์การแข่งขันสะสมอาวุธในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้: กรณีศึกษา ประเทศมาเลเซีย สิงคโปร์ อินโดนีเซีย,” Ph.D. dissertation, Faculty of Political Science, Thammasat University, Bangkok, Thailand, 2016. [Online]. Available: https://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:138296. [Accessed: Dec. 5, 2024].

² ไม่จำเป็นจะเป็นการซื้อสำเร็จรูปหรือนำเข้ายุทธโประณ์จากต่างประเทศ การได้มาจากตลาดมืด การแสวงหาความร่วมมือทางอุตสาหกรรมเพื่อร่วมทุนหรือรับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากประเทศเจ้าของเทคโนโลยี หรือการพัฒนาบ่ออาวุธเองในประเทศ

³ ในที่นี้ เลือกศึกษาเฉพาะจรวดเท่านั้น เนื่องจากจรวด ถือเป็นอาวุธยุทธศาสตร์ (strategic weapon) เช่นเดียวกับ เรือบรรทุกเครื่องบิน รอยิงระเบิดนิวเคลียร์ เรือดำน้ำ เครื่องบินทิ้งระเบิด ต่างจากอาวุธตามแบบ (conventional weapon) เช่น อาวุธปืนเล็ก รถถัง รถยานเกราะ อากาศยานขับไล่ เรือรบ สาเหตุที่ต้องมีการแบ่งแยกอาวุธยุทธศาสตร์จากอาวุธตามแบบนั้น เนื่องจากอาวุธยุทธศาสตร์ส่วนใหญ่ ถ้านำมาใช้งานจะมีอำนาจการทำลายล้างที่รุนแรง มากกว่าอาวุธตามแบบ จนทำให้สถานการณ์ความขัดแย้งพลิกผันได้ รวมทั้งสร้างบรรยากาศแห่งความหวาดกลัวให้กับฝ่ายที่ตั้งรับอยู่มากกว่าการครอบครองอาวุธตามแบบ เพราะเพียงการที่ฝ่ายหนึ่งมีอาวุธยุทธศาสตร์ไว้ในอัตราครอบครองก็สามารถสร้างบรรยากาศการป้องปราม (deterrence) ที่มีประสิทธิภาพไปสู่อีกฝ่ายหนึ่งได้ ทั้ง ๆ ที่ยังไม่ได้นำมาใช้งาน เช่น การมีอยู่ของเรือดำน้ำ เรือบรรทุกเครื่องบิน หรือรถถังจรวด แม้ว่าจะใช้งานหรือไม่ก็ตาม อีกฝ่ายก็จะวิตกกังวลเสมอว่ามันถูกใช้หรือยัง ใช้โดยใคร ใช้ในสถานที่ใด เพราะฝ่ายตรงข้ามจะต้องคำนึงถึงความเสี่ยงและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นหากมีการใช้อาวุธดังกล่าว ในทางกลับกัน อาวุธตามแบบ เช่น ปืนเล็กยาว รถถัง หรือเครื่องบินขับไล่ แม้จะมีความสำคัญในสนามรบ แต่อำนาจการทำลายล้างและผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นจำกัดอยู่ในพื้นที่เฉพาะ เรียกได้ว่า การแบ่งแยกอาวุธยุทธศาสตร์ออกจากอาวุธตามแบบจึงมีความสำคัญ เนื่องจากอาวุธยุทธศาสตร์มีศักยภาพในการเปลี่ยนแปลงสมดุลของความขัดแย้งและสร้างบรรยากาศของการป้องปรามที่มีประสิทธิภาพมากกว่า การมีหรือไม่มีอาวุธเหล่านี้สามารถส่งผลกระทบต่อทัศนคติและพฤติกรรมของฝ่ายตรงข้ามได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม สงครามในยุคปัจจุบันเส้นแบ่งของอาวุธยุทธศาสตร์และอาวุธตามแบบได้จางลงเรื่อย ๆ เพราะอาวุธตามแบบบางประการ เช่น อากาศยานไร้คนขับหรือจรวดต่อสู้อากาศยาน กลับสร้างผลกระทบเชิงยุทธศาสตร์ได้มากกว่าสงครามตามแบบทั่วไปด้วย เช่น สถานการณ์ความขัดแย้งรัสเซีย-ยูเครน ที่จรวดต่อสู้อากาศยานสามารถเปลี่ยนการตัดสินใจของรัสเซียให้ลดการใช้รถถังหลักในสนามรบได้ เพราะไม่คุ้มที่จะสูญเสียให้กับจรวดต่อสู้อากาศยานและพันมิตร เป็นต้น

ภูมิภาคและความสัมพันธ์ระหว่างประเทศ และ 3. เป็นแนวทางการศึกษาสำหรับประเทศไทยควรมีนโยบายทางความมั่นคงและวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต่อแต่ละโครงการ ในแต่ละประเทศเป็นไปในทิศทางใด

2. กรอบการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ ดำเนินการคัดเลือกจรวดในภูมิภาคมาจำนวนหนึ่งแล้ว จากนั้นทำการทดลองวัดเทียบขีดความสามารถของจรวดและศักยภาพอุตสาหกรรมลงในระนาบแกน X และแกน Y เพื่อศึกษาแนวโน้มนการพัฒนาในอนาคตว่าจะมีทิศทางอย่างไร กล่าวคือในแกน Y จะทดลองวัดเทียบขีดความสามารถกำลังรบ (Combat Capabilities) ของจรวดต่าง ๆ ทั้ง 5 ด้าน⁴ โดยถือว่า ขีดความสามารถที่ 0%-49% เป็นขีดความสามารถระดับต่ำ ขีดความสามารถ 50%-75% เป็นขีดความสามารถระดับปานกลาง และ 76%-100% เป็นขีดความสามารถระดับสูง และในแกน X จะทดลองวัดเทียบขีดความสามารถทางอุตสาหกรรม (Industrial Capabilities) ที่มีอยู่ราว ๆ 10 ขั้นตอนที่แตกต่างกัน⁵ โดยที่ขีดความสามารถในระดับที่ 0-3 ถือว่าพึ่งพาตนเองได้ระดับต่ำที่ยังต้องพึ่งพาต่างประเทศ

อยู่มาก ส่วนระดับ 4-6 ถือว่าพึ่งพาตนเองในระดับปานกลาง อาจผลิตได้บางส่วนหรือร่วมพัฒนา ส่วนระดับ 7-10 ถือว่าพึ่งพาตนเองได้สูงถึงขั้นเป็นผู้ผลิตและส่งออก จากนั้นนำเสนอเกณฑ์วัดของแต่ละแกนให้ทราบ และนำมาจัดให้อยู่ในระนาบเดียวกัน

2.1. ด้านขีดความสามารถกำลังรบ

ตามหนังสือ Missile Technology: Accelerating Challenges ของ International Institute for Strategic Studies (IISS) ที่เป็น Think Tank ด้านการทหารและความมั่นคงของสหรัฐอเมริกาที่มีชื่อเสียงระดับโลก ได้เสนอว่า ขีดความสามารถกำลังรบจรวดนั้นมีอยู่ 3 ประการด้วยกัน นั่นคือ ระยะยิง (Range)⁶ หัวรบ (Warhead)⁷ ความแม่นยำ (Accuracy)⁸ อีก 2 ประการที่ผู้เขียนคิดขึ้นเองไม่ได้อยู่ในตำราของ IISS คือ ความคล่องตัวและความสามารถในการเคลื่อนย้าย (Mobility and Deployability)⁹ และความสามารถในการยิงต่อเนื่องหรือยิงเป็นชุด (Salvo Capability)¹⁰ ทั้งนี้ เพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณ จะให้คะแนนการประเมินแต่ละด้านอยู่ที่ด้านละ 20% ตามแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 1 ดังต่อไปนี้

⁴ IISS, “MDI Missile Technology: Accelerating Challenges,” Strategic Dossiers, International Institute for Strategic Studies (IISS), 2024. [Online]. Available: <https://www.iiss.org/publications/strategic-dossiers/mdi-missile-technology-accelerating-challenges/>. [Accessed: 05-Dec-2024].

⁵ K. Krause, Arms and the State: Patterns of Military Production and Trade. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1992.

⁶ ระยะยิงคือระยะทางสูงสุดที่จรวดสามารถเดินทางไปถึงเป้าหมายได้ โดยไม่สูญเสียความแม่นยำหรือประสิทธิภาพของหัวรบ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในเชิงยุทธศาสตร์ เพราะจรวดที่มีระยะยิงไกลสามารถโจมตีเป้าหมายได้จากระยะปลอดภัย และสามารถเข้าถึงพื้นที่เป้าหมายที่อยู่ลึกในดินแดนของศัตรู

⁷ หัวรบคือส่วนที่บรรจุสารระเบิด (Explosives) หรือวัสดุที่สร้างความเสียหาย เช่น ระเบิดแรงสูง (High Explosive - HE) หรือหัวรบแบบพิเศษ เช่น หัวรบเคมี ชีวภาพ หรือหัวรบนิวเคลียร์ ขนาดและประสิทธิภาพของหัวรบมีผลต่อขอบเขตความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อไปถึงเป้าหมาย

⁸ ความแม่นยำคือความสามารถของจรวดในการเข้าถึงเป้าหมายที่กำหนดไว้อย่างถูกต้อง ความแม่นยำมักวัดจาก Circular Error Probable (CEP) ซึ่งหมายถึงรัศมีวงกลมที่จรวด 50% จะตกอยู่ภายใน ยิ่งค่าต่ำแสดงว่าจรวดแม่นยำมาก

⁹ ความคล่องตัวหมายถึงความง่ายในการขนส่งและการใช้งานของจรวดในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น ความสามารถในการบรรทุกบนยานพาหนะ การเคลื่อนย้ายในสภาพภูมิประเทศที่หลากหลาย และการติดตั้งหรือยิงได้อย่างรวดเร็ว

¹⁰ ความสามารถในการยิงต่อเนื่องคือจำนวนจรวดที่สามารถยิงได้ในครั้งเดียวหรือในระยะเวลาสั้น ๆ การยิงต่อเนื่องช่วยเพิ่มโอกาสในการทำลายเป้าหมาย และสร้างแรงกดดันทางจิตวิทยาต่อศัตรู



รูปที่ 1 รูปแบบของกรอบแนวคิดบันไดขั้นแห่งการผลิต (Ladder of Production) ของ Keith Krause



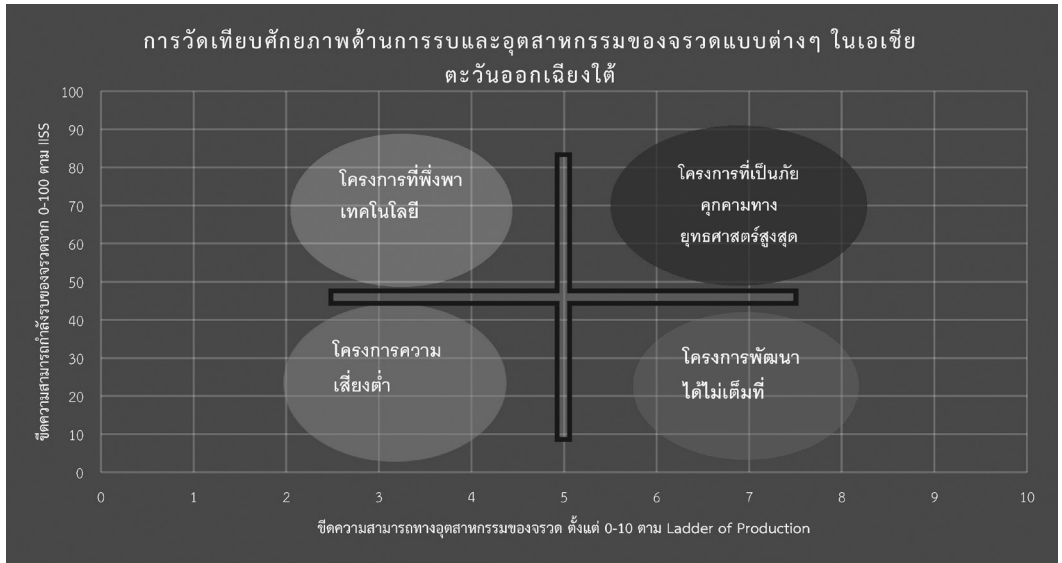
รูปที่ 2 รูปแบบของกรอบแนวคิดบันไดขั้นแห่งการผลิต (Ladder of Production) ของ Keith Krause

2.2. ด้านขีดความสามารถทางอุตสาหกรรม

มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนให้ประเทศสามารถก้าวผ่านแต่ละขั้นของบันไดการผลิต ไปจนถึงความสามารถในการพึ่งพาตนเองตามลำดับขั้น เริ่มตั้งแต่การบำรุงรักษาขั้นพื้นฐาน (Basic Maintenance) การประกอบชิ้นส่วน (Final Assembly) ไปจนถึงการพัฒนาและผลิตเทคโนโลยีที่ซับซ้อน (Complex Independent Manufacturing) ซึ่งทำให้เกิดความต่อเนื่องและครบวงจรในกระบวนการผลิต

ยุทธศาสตร์ รวมถึงการวิจัยและพัฒนา (R&D) ที่สามารถบูรณาการองค์ความรู้และทรัพยากรที่หลากหลาย เพื่อสร้างนวัตกรรมและยกระดับผลิตภัณท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งหมดนี้ แสดงอยู่ในรูปแบบของกรอบแนวคิดบันไดขั้นแห่งการผลิต (Ladder of Production)¹¹ ที่แสดงให้เห็นถึงระดับความซับซ้อนและศักยภาพที่แตกต่างกันในอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในลักษณะของขั้นบันได 11 ขั้น สามารถอธิบายโดยใช้แผนภาพดังแสดงในรูปที่ 2

¹¹Keith Krause, Arms and the State: Patterns of Military Production and Trade (bridge: Cambridge University Press, 1992).



รูปที่ 3 การวัดเทียบศักยภาพด้านการรับและอุตสาหกรรมของจรวดแบบต่าง ๆ ของประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

2.3 การรวมแกน X และ Y ในระนาบเดียวกัน

แกน X-Y ด้านบนรูปที่ 3 มีไว้เพื่อให้นำตัวเลขขีดความสามารถกำลังรบ และขีดความสามารถทางอุตสาหกรรม ของจรวดแต่ละประเภทมารอกให้อยู่ในระนาบเดียวกัน การดำเนินการเช่นนี้ จะเกิด

การจัดประเภทฉากทัศน์ (Typology) จนเห็นแนวโน้มของการพัฒนาจรวดในภูมิภาค รวมทั้งประเมินภัยคุกคามได้อย่างชัดเจนและเป็นเหตุเป็นผลมากขึ้นด้วย ดังแสดงในตารางที่ 1 (ผู้เขียนเป็นผู้ประเมินคุณลักษณะและแนวทางการรับมือ)

ตารางที่ 1 ตารางวิเคราะห์ขีดความสามารถกำลังรบและขีดความสามารถอุตสาหกรรมของฉากทัศน์แต่ละรูปแบบ

การจัดประเภท	ขีดความสามารถกำลังรบสูง	ขีดความสามารถกำลังรบต่ำ
ขีดความสามารถอุตสาหกรรมสูง	ฉากทัศน์: โครงการที่เป็นภัยคุกคามยุทธศาสตร์สูงสุด คุณลักษณะ: เป็นโครงการที่มีศักยภาพในการพัฒนาและผลิตจรวดที่มีประสิทธิภาพสูง พร้อมทั้งมีอุตสาหกรรมป้องกันประเทศและอุตสาหกรรมเกี่ยวเนื่องที่เข้มแข็ง สามารถพึ่งพาตนเองในการผลิตและพัฒนายุทธโศปกรณ์ได้อย่างเต็มที่	ฉากทัศน์: โครงการพัฒนาได้ไม่เต็มที่ คุณลักษณะ: เป็นโครงการที่มีศักยภาพในการผลิตจรวดหรืออาวุธนำวิถี แต่ผลิตภัณฑ์จรวดที่ได้อาจมีประสิทธิภาพต่ำ อาจเนื่องจากข้อจำกัดทางเทคโนโลยีทางทหารหรือการออกแบบ แต่ว่าอุตสาหกรรมภาคพลเรือนยังแข็งแรง ดังนั้นอุตสาหกรรมทหารจะเติบโตอีกในเวลาอันสั้น หากได้รับความช่วยเหลือจากประเทศเจ้าของเทคโนโลยีจะพัฒนาได้อย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 1 ตารางวิเคราะห์ขีดความสามารถกำลังรบและขีดความสามารถอุตสาหกรรมของฉากทัศน์แต่ละรูปแบบ

การจัดประเภท	ขีดความสามารถกำลังรบสูง	ขีดความสามารถกำลังรบต่ำ
	แนวทางการรับมือ: 1. ถ้าความสัมพันธ์ดี ควรรณรงค์สร้างพันธมิตรกับผู้นำทางการเมืองและการทหารของประเทศนั้น เพื่อยับยั้งภัยคุกคาม หรือสนับสนุนการจัดตั้งโครงการความร่วมมือพัฒนายุทธโศปกรณ์ร่วมกัน เพื่อสร้างความเชื่อใจและลดความเสี่ยงต่อการเกิดความขัดแย้งในอนาคต 2. ถ้าความสัมพันธ์ไม่ดี เริ่มจากการสร้างพันธมิตรทางทหารกับประเทศที่เป็นภัยกับประเทศเป้าหมายนั้น เพื่อเปลี่ยนดุลอำนาจทางการทหารให้ประเทศเป้าหมายไม่กล้าดำเนินการใดต่อไป หากสถานการณ์ไม่ดีขึ้น ให้ลงทุนกับระบบข่าวกรองเพื่อวิเคราะห์ศักยภาพของจรวดนั้น แล้วลงทุนในระบบป้องกันภัยทางอากาศหรือ missile defence โดยด่วนเพื่อเตรียมการรับมือภัยคุกคาม หรือจับตาดูบทบาท NGOs ที่ต่อต้านโครงการการพัฒนาอาวุธของประเทศเป้าหมายเพื่อให้เกิดการพัฒนาล่าช้าลงไปเรื่อย ๆ	แนวทางการรับมือ: 1.ถ้าความสัมพันธ์ดี ผลักดันการเปลี่ยนวัตถุประสงค์จรวดเพื่อพลเรือนร่วมมือกับประเทศเป้าหมายในการปรับใช้เทคโนโลยีจรวดเพื่อการสำรวจทางภูมิศาสตร์ การพยากรณ์อากาศ หรือการส่งดาวเทียมขนาดเล็ก (CubeSat) เพื่อประโยชน์ด้านการศึกษาและการเกษตร ไม่ให้วุ่นวายดำเนินการกับภารกิจทางการทหาร 2. ถ้าความสัมพันธ์ไม่ดี ควรจับตาความคืบหน้าในการปรับปรุงเทคโนโลยีจรวดโดยเจรจากับประเทศเจ้าของเทคโนโลยีที่หนุนหลังประเทศนั้นว่า การแบ่งปันเทคโนโลยีให้กับโครงการนั้นจะทำให้ดุลอำนาจทางการทหารเปลี่ยนแปลงไป และสร้างความวิตกกังวลในการดำเนินธุรกิจและวิถีชีวิตของประชาชน หรืออาจชักชวนให้พัฒนาจรวดเพื่อวัตถุประสงค์อื่นๆ นอกเหนือจากการรบ เช่น การดัดแปลงสภาพอากาศ การส่งดาวเทียม เป็นต้น
ขีดความสามารถอุตสาหกรรมต่ำ	ฉากทัศน์: โครงการที่พึ่งพาเทคโนโลยีต่างชาติ คุณลักษณะ: เป็นโครงการที่มีจรวดที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ยังคงพึ่งพาการนำเข้าเทคโนโลยีหรือชิ้นส่วนจากต่างประเทศ เนื่องจากอุตสาหกรรมภายในประเทศยังไม่สามารถผลิตได้เอง แนวทางการรับมือ: 1. ถ้าความสัมพันธ์ดี เสนอขายเทคโนโลยีหรือชิ้นส่วนที่ไทยสามารถผลิตได้ และราคาถูกกว่าประเทศเจ้าของเทคโนโลยีนั้น เพื่อสร้างภาวะพึ่งพิง และเพื่อเสริมสร้างความสัมพันธ์เชิงเศรษฐกิจ 2. ถ้าความสัมพันธ์ไม่ดี ให้ใช้มาตรการคว่ำบาตรทางเศรษฐกิจ (Sanctions) เช่น ยกเลิกส่งออกสินค้าวัตถุดิบทางเทคโนโลยีไปยังประเทศนั้น พร้อมประณามทางการทูต (Diplomatic Condemnation) เพื่อสกัดกั้นหรือบั่นทอนกำลังอำนาจ	ฉากทัศน์: โครงการความเสี่ยงต่ำ คุณลักษณะ: เป็นโครงการที่พึ่งประสิทธิภาพของจรวดและศักยภาพทางอุตสาหกรรมยังอยู่ในระดับต่ำ ต้องพึ่งพาการนำเข้าและขาดความสามารถในการพัฒนาเอง แนวทางการรับมือ: 1.ถ้าความสัมพันธ์ดี ให้สนับสนุนการค้าขายอุปกรณ์ทางการทหารที่ไม่ซับซ้อนจากไทยในราคาที่เป็นมิตร พร้อมเงื่อนไขที่ให้การสนับสนุนการฝึกอบรมเฉพาะการใช้งาน โดยต้องมีศูนย์ซ่อมบำรุงที่ไทยเท่านั้น และควรให้ความช่วยเหลือทางพลเรือนอื่น ๆ เพื่อให้เป็นพันธมิตรกับไทย และให้มีพฤติกรรมเคยชินในการนำเข้ายุทธโศปกรณ์ จนประเทศนั้นไม่ต้องใช้งบประมาณและความพยายามในการพัฒนาขีดความสามารถด้านการทหารใด ๆ ที่จะทำลายดุลอำนาจเดิมขึ้นมาอีก

ตารางที่ 1 ตารางวิเคราะห์ขีดความสามารถกำลังรบและขีดความสามารถอุตสาหกรรมของภาคพิเศษแต่ละรูปแบบ

การจัดประเภท	ขีดความสามารถกำลังรบสูง	ขีดความสามารถกำลังรบต่ำ
	ทางเศรษฐกิจของประเทศนั้นให้ไม่พัฒนาไปมากกว่านี้ หากประเทศเป้าหมายยังดำเนินโครงการพัฒนาจรวดต่อไป ให้เตรียมการโจมตีทางไซเบอร์หรือเก็บข้อมูลที่ตั้งทางกายภาพต่อสถานที่ หรือโครงสร้างพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับโครงการนั้น เพื่อรู้ล่วงหน้าให้การพัฒนาหยุดชะงัก หรือมีความคืบหน้าช้าลง	2. ถ้าความสัมพันธ์ไม่ดี อาจจะต้องสนับสนุนองค์กรนอกภาครัฐ (NGOs) ในประเทศนั้น ให้กดดันรัฐบาลให้นำงบประมาณมาพัฒนาสังคม การศึกษา โครงสร้างพื้นฐาน แทนการเพิ่มศักยภาพอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ หรือจัดให้มีการสวนสนามยานยนต์ และการซ้อมรบใกล้แนวชายแดนเพื่อเป็นการแสดงแสนยานุภาพเพื่อการป้องปราม (Deterrence) เน้นการแสดงความพร้อมรบ และขีดความสามารถในการตอบโต้ภัยคุกคาม ตลอดจนเสริมสร้างเสถียรภาพทางยุทธศาสตร์ และความเชื่อมั่นในระดับภูมิภาค

3. การรวบรวมข้อมูลภูมิทัศน์โครงการพัฒนาจรวดภายในประเทศของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ในปัจจุบัน การจัดหาอาวุธยุทธโปกรณ์ของประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงแค่การนำเข้าจากต่างประเทศอีกต่อไป แต่ได้หันมาให้ความสำคัญกับการพัฒนาอาวุธในประเทศเพื่อบรรลุเป้าหมายการพึ่งพาตนเอง (Self-Reliance) มากขึ้น โดยเฉพาะโครงการพัฒนาจรวดที่ได้รับการผลักดันให้เป็นโครงการระดับชาติที่มีความสำคัญเชิงยุทธศาสตร์ การพัฒนาดังกล่าวสะท้อนถึงความพยายามในการเสริมสร้างความมั่นคงแห่งชาติด้วยการลดการพึ่งพิงจากภายนอก พร้อมทั้งเพิ่มศักยภาพในการป้องกันประเทศให้เข้มแข็งยิ่งขึ้น โดยแรงขับเคลื่อนสำคัญที่อยู่เบื้องหลังการริเริ่มโครงการพัฒนาจรวดภายในประเทศนี้ ไม่ได้มีเพียงแค่ปัจจัยด้านการทหาร แต่ยังรวมถึงเป้าหมายเชิงเศรษฐกิจและการเมือง เช่น การกระตุ้นการพัฒนานวัตกรรมทางเทคโนโลยี การสร้างงานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง และการสร้างอำนาจต่อรองในเวทีระหว่าง

ประเทศ อย่างไรก็ตาม แม้โครงการเหล่านี้จะช่วยเพิ่มศักยภาพด้านความมั่นคงให้แก่รัฐผู้พัฒนา แต่การขยายตัวของเทคโนโลยีจรวดภายในภูมิภาคก็อาจนำไปสู่ความไม่มั่นคงในระดับภูมิภาค เนื่องจากการเพิ่มศักยภาพด้านอาวุธมักสร้างความวิตกกังวลให้แก่รัฐเพื่อนบ้านได้ เรียกได้ว่า ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้กำลังอยู่ในจุดเปลี่ยนสำคัญที่รัฐต่าง ๆ ต้องตระหนักถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการพัฒนาโครงการลักษณะนี้ ทั้งในแง่โอกาสในการเสริมสร้างศักยภาพและความเสี่ยงต่อการเผชิญหน้าทางการเมืองและความมั่นคงที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

ทั้งนี้ โครงการจรวดส่วนหนึ่งที่สามารถเข้าถึงได้จากข้อมูลเปิด โดยไม่แยกแยะเป็นจรวดทางยุทธวิธีหรือจรวดทางยุทธศาสตร์ เพราะขีดความสามารถของจรวดทั้งสองแบบสร้างผลกระทบเชิงยุทธศาสตร์ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก ต่างกันเฉพาะกำลังผลิตและจำนวนคงคลังจรวดที่กำลังพัฒนาในประเทศของแต่ละรัฐ มีคุณลักษณะดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 แสดงศักยภาพด้านการรบและอุตสาหกรรมของจรวดที่พัฒนาเองในประเทศของรัฐในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ใส่หัว ตาราง	ชื่อจรวด	วิจัย/พัฒนา/ ผลิตโดย	ระยะยิง	หัวรบ	ความแม่นยำ	ความคล่องตัว/ การเคลื่อนย้าย	การยิงต่อ เนื่องซัลโว	ชั้นบันได การผลิต
อินโดนีเซีย	R-Han 122 มม. ¹²	รัฐวิสาหกิจ PT Pindad	32 กม.	HE 18 กก.	ไม่นำวิถี CEP 60-100 เมตร	บรรทุก บนรถบรรทุก ขนาดเล็ก	ท่อยิงต่อเนื่อง 40 นัด	ชั้นที่ 10
สิงคโปร์	Matador ¹³	Rafael Advanced Defense System และ Defence Science and Technology Agency Proteus	500 เมตร	HE 2.6 กก.	ไม่นำวิถี CEP 50 เมตร	คล่องตัวสูงมาก สามารถพกพาได้	ยิงได้ทีละ 1 ลูก ต่อทหาร 1 คน	ชั้นที่ 8
	Blue Spear ¹⁴	Advanced Systems ¹⁵	290 กม.	HE 150 กก.	Inertial Navigation System (INS) CEP 50 เมตร	ติดตั้งได้ทั้ง บนรถบรรทุก และเรือผิวน้ำ	ท่อยิงต่อเนื่อง 4 ลูก	ชั้นที่ 6
เวียดนาม	KCT-15 ¹⁶ 420 มม.หรือ VCM-01	บริษัท Viettel Aerospace	200 กม.	HE 145 กก.	INS และ GLONASS โดยมี CEP 10-50 เมตร	ติดตั้งบนเรือ คอร์เวตต์	ท่อยิงต่อเนื่อง 8 ลูก บนเรือรบ	ชั้นที่ 5
	P-5 Pyatyorka/ Shaddock ¹⁷	สำนักงานออกแบบ Chelomey ของ รัสเซียถ่ายทอด มายังกองทัพอากาศ เวียดนาม	550 กม.	HE 300 กก.	INS โดยมี CEP 3000 เมตร	ติดตั้งได้ทั้ง บนรถบรรทุก และเรือผิวน้ำ	ท่อยิงต่อเนื่อง 4 ลูก บนเรือรบ	ชั้นที่ 2

¹²Indonesia Official Portal, "BRIN, Pindad Secure Seven Rocket Patents," Indonesia.go.id. [Online]. Available: <https://indonesia.go.id/kategori/culture/7856/brin-pindad-secure-seven-rocket-patents?lang=2>. [Accessed: Dec. 6, 2024].

¹³Rafael Advanced Defense Systems Ltd., "SPIKE - Family of Multi-Purpose, Tactical Missiles," Dec. 2012. [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20121224064344/http://www.rafael.co.il/marketing/SIP_STORAGE/FILES/5/925.pdf. [Accessed: Dec. 7, 2024].

¹⁴Proteus, "Proteus reveals more details of Blue Spear missile," Defense News, Feb. 15, 2022. [Online]. Available: https://www.defensenews.com/smr/singapore-airshow/2022/02/15/proteus-reveals-more-details-of-blue-spear-missile/?utm_source=chatgpt.com. [Accessed: Dec. 07, 2024].

¹⁵ซึ่งเป็น JV ระหว่าง Israel Aerospace Industries (IAI) และ ST Engineering Land Systems ของสิงคโปร์ โดย ST Engineering ผลิต Booster และ Warhead

¹⁶กองทัพเรือไทย, "เวียดนาม ประสบความสำเร็จในการผลิตอาวุธปล่อยนำวิถีต่อต้านเรือผิวน้ำ แบบ KCT-15," สำนักงานผู้ช่วยทูตฝ่ายทหารเรือไทย ณ กรุงฮานอย, 26 พฤษภาคม 2563. [ออนไลน์]. Available: https://www.attachehanoi.navy.mi.th/index.php/main/detail/content_id/3548. [เข้าถึงเมื่อ: 6 ธันวาคม 2567].

¹⁷Nguyen, T. T. (2016). Accommodating the dragon: Vietnam's enduring asymmetric entanglements with China (Doctoral dissertation, Hong Kong Baptist University). Retrieved from <https://scholars.hkbu.edu.hk/en/studentTheses/accommodating-the-dragon-vietnams-enduring-asymmetric-entanglemen>

ตารางที่ 2 แสดงศักยภาพด้านการรบและอุตสาหกรรมของจรวดที่พัฒนาเองในประเทศของรัฐในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ใส่หัว ตาราง	ชื่อจรวด	วิจัย/พัฒนา/ ผลิตโดย	ระยะยิง	หัวรบ	ความแม่นยำ	ความคล่องตัว/ การเคลื่อนย้าย	การยิงต่อ เนื่องซัลโว	ชั้นบันได การผลิต
เมียนมา	MAM-01 122 มม.	กรมการ อุตสาหกรรม ทหารเมียนมา	20 กม.	HE 18 กก.	ไม่นำวิถี CEP 100 เมตร	บรรทุก บนรถบรรทุก ขนาดปานกลาง	ท่อยิงต่อเนื่อง 40 นัด	ขั้นที่ 5
	MAM-02 240 มม.		50 กม.	HE 90 กก.	ไม่นำวิถี CEP 200 เมตร	บรรทุก บนรถบรรทุก ขนาดใหญ่	ท่อยิงต่อเนื่อง 12 นัด	ขั้นที่ 4
	MAM-03		290 กม.	HE 150 กก.	INS และ GLONASS โดยมี CEP ที่ 30-45 เมตร	บรรทุก บนรถบรรทุก ขนาดใหญ่มาก	ท่อยิงต่อเนื่อง 4 นัด	ขั้นที่ 3

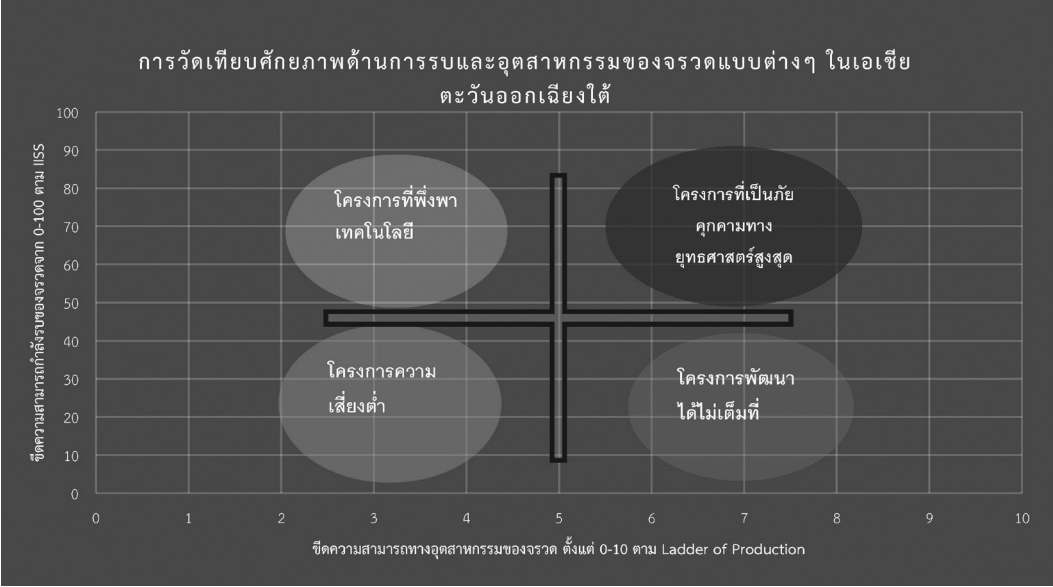
ตารางที่ 3 คำนวณแปลงค่าศักยภาพด้านการรบและอุตสาหกรรมของจรวดที่พัฒนาเองในประเทศของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ให้เป็น Percentile/ Score

ชื่อจรวด	คะแนน ระยะยิงเป็น Percentile และคะแนน 1-20	คะแนน หัวรบเป็น Percentile และคะแนน 1-20	คะแนน ความแม่นยำ เป็น Percentile และคะแนน 1-20	คะแนน ความคล่องตัว/ การเคลื่อนย้าย เป็น 1-20	คะแนน การยิงต่อเนื่อง ซัลโว เป็น 1-20	รวมคะแนน (Total Score)	ชั้นบันได การผลิต
R-Han 122 มม.	Percentile-38, Score-8/20	Percentile-42, Score-8/20	Percentile-62, Score-12/20	Score-15/20	Score-19/20	62	ขั้นที่ 10
Matador	Percentile-12, Score-2/20	Percentile-17, Score-3/20	Percentile-44, Score-9/20	Score-18/20	Score-2/20	34	ขั้นที่ 8
Blue Spear	Percentile-81, Score-16	Percentile-83, Score-17/20	Percentile-44, Score-9/20	Score-15/20	Score-8/20	65	ขั้นที่ 6
KCT-15	Percentile-62, Score-12	Percentile-67, Score-13/20	Percentile-12, Score-2/20	Score-12/20	Score-12/20	51	ขั้นที่ 4
P-5 Pyatyorka/ Shaddock	Percentile-100, Score-20	Percentile-100, Score-20/20	Percentile-100, Score-20/20	Score-18/20	Score-8/20	86	ขั้นที่ 2
MAM-01 122 มม.	Percentile-25, Score-5/20	Percentile-33, Score-7/20	Percentile-62, Score-12/20	Score-12/20	Score-19/20	55	ขั้นที่ 6
MAM-02 240 มม.	Percentile-50, Score-10/20	Percentile-56, Score-11/20	Percentile-77, Score-15/20	Score-10/20	Score-15/20	61	ขั้นที่ 4
MAM-03	Percentile-81, Score- 16/20	Percentile-83, Score-17/20	Percentile-83, Score-17/20	Score-8/20	Score-8/20	66	ขั้นที่ 3

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อเรานำข้อมูลคะแนนจากตารางคำนวณแปลงค่าศักยภาพด้านการรบในแกนตั้ง Y และศักยภาพอุตสาหกรรมในแกนนอน X ของจรวดที่พัฒนาเอง

ในประเทศของรัฐในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ให้เป็น Percentile/ Score จากหัวข้อที่ 3 มาพล็อตในระนาบเดียวกัน จะได้ค่าดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การวัดเทียบศักยภาพด้านการรับและศักยภาพอุตสาหกรรมของจรวดแบบต่าง ๆ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

5. การสังเคราะห์และตีความข้อมูล เพื่อสร้างแนวทางการรับมือต่อประเทศเป้าหมายในแต่ละฉากทัศน์

5.1 ฉากทัศน์: โครงการที่เป็นภัยคุกคามยุทธศาสตร์สูงสุด

ปรากฏจรวด 3 แบบในฉากทัศน์นี้ ใน 3 ประเทศ แยกวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4

5.2 ฉากทัศน์: โครงการพัฒนาได้ไม่เต็มที่

ปรากฏจรวด 1 แบบในฉากทัศน์นี้ ใน 1 ประเทศ คือ จรวด MATADOR ประเทศสิงคโปร์ ดังแสดงในตารางที่ 4

5.3 ฉากทัศน์: โครงการที่พึ่งพาเทคโนโลยีต่างชาติ

ปรากฏจรวด 4 แบบในฉากทัศน์นี้ ใน 2 ประเทศ คือ จรวด P-5, KCT-15 จากประเทศเวียดนาม และ MAM-02/MAM-03 จากประเทศเมียนมา ดังแสดงในตารางที่ 4

5.4 ฉากทัศน์: โครงการความเสี่งต่ำ

ยังไม่ปรากฏโครงการจรวดในฉากทัศน์นี้

ตารางที่ 4 ตารางการวิเคราะห์แนวทางความสัมพันธ์ระหว่างประเทศต่อการพัฒนาจรวดแต่ละโครงการ

	ความสัมพันธ์ระหว่างประเทศ	แนวทางการรับมือด้านความสัมพันธ์ระหว่างประเทศและด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
R-Han 122 มม. จากอินโดนีเซีย	ระดับดี	ส่งเสริมการสร้างพันธมิตรทางการเมืองและการทหารกับอินโดนีเซีย เพื่อสร้างความไว้วางใจและลดความเสี่ยงของภัยคุกคามในระยะยาว รวมทั้ง สนับสนุนการจัดตั้งโครงการความร่วมมือพัฒนายุทธโธปกรณ์ เช่น การร่วมผลิตจรวดหรือเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง เพื่อเพิ่มความพึ่งพาระหว่างกัน กรณีจรวด R-Han 122 มม. ที่ประเทศไทยมีขีดความสามารถอยู่แล้วจาก DTI-2 ควรเลือกแนวทางการร่วมมือวิจัยและพัฒนาเพื่อพัฒนาระบบที่แต่ละประเทศยังก้าวไปถึง เช่นระบบนำวิถี หรือการผลิตร่วม เพื่อเพิ่ม Economy of Scale รวมทั้งการรับรองมาตรฐานเพื่อเข้าสู่ภาคอุตสาหกรรมของแต่ละประเทศ
BLUE SPEAR จากสิงคโปร์	ระดับดี	ส่วนจรวด BLUE SPEAR ที่ประเทศไทยยังไม่มีขีดความสามารถ ควรเลือกการรับการถ่ายทอดเทคโนโลยี แต่ไม่ควรหวังผลเลิศ เพราะเจ้าของเทคโนโลยีคืออิสราเอล ไม่ใช่สิงคโปร์ สิงคโปร์ไม่น่าจะแบ่งปัน ไทยอาจเสนอว่าไทยนำช่วยผลิตบางชิ้นส่วนของจรวดได้

ตารางที่ 4 ตารางการวิเคราะห์แนวทางความสัมพันธ์ระหว่างประเทศต่อการพัฒนาจรวดแต่ละโครงการ

	ความสัมพันธ์ระหว่างประเทศ	แนวทางการรับมือด้านความสัมพันธ์ระหว่างประเทศและด้านเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
MAM-01, MAM-02, MAM-03 จากเมียนมา	ระดับไม่ดี	1. สร้างพันธมิตรทางทหารกับประเทศที่เป็นคู่แข่งหรือประเทศที่มีผลประโยชน์ขัดแย้งกับเมียนมา เช่น อินเดียหรือบังกลาเทศ เพื่อเปลี่ยนดุลอำนาจทางการทหาร 2. แรงหนุนในระบบข่าวกรองเพื่อวิเคราะห์ความสามารถของจรวด MAM-01 และพัฒนาระบบป้องกันภัยทางอากาศ เพื่อรับมือกับภัยคุกคาม 3. ดำเนินการใด ๆ เช่น แสดงความกังวล จัดเวทีสัมมนาวิชาการ หรือออกแถลงการณ์สร้างแรงกดดันต่อการผันทรัพยากรไปในโครงการจรวดและส่งผลต่อขีดความสามารถของเมียนมาในการพัฒนายุทธโศปกรณ์ 4. ดำเนินการโจมตีทางไซเบอร์ต่อโครงสร้างพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาจรวด โดยหลีกเลี่ยงการยกระดับความขัดแย้งระหว่างประเทศ 5. ส่วนประกอบของจรวดส่วนใหญ่เมียนมาจะพึ่งพิงรัสเซีย แต่ขณะนี้รัสเซียยังมีความขัดแย้งอยู่จึงทำให้ความช่วยเหลือน่าจะหยุดชะงักหรือล่าช้าลง ชุดจรวด MAM เป็นจรวดที่มีพิสัยการยิงถึงประเทศไทยในแนวลึก คาดว่าในเชิงปริมาณจะมีคงคลังอยู่อย่างจำกัด การพึ่งพิงรัสเซียทำให้การพัฒนาเป็นไปอย่างช้า ๆ จรวดนี้เป็นอาวุธที่รัฐบาลน่าจะเลือกใช้กับรัฐรอบด้าน มากกว่าการใช้กับชนกลุ่มน้อยที่ต่อต้านรัฐบาลทหารในประเทศ ไทยควรใช้มาตรการเผื่อระวัง และการกดดันทางทหาร และการเตรียมโจมตีทางไซเบอร์ เพื่อชะลอการพัฒนาเทคโนโลยีจรวดและลดความเสถียรต่อความมั่นคงของไทย รวมทั้งเผื่อระวังสถานการณ์ชายแดนให้รัดกุม
จรวด MATADOR ลิงคโปร์	ระดับดี	คล้ายกับกรณีของ BLUE STAR ที่ประเทศลิงคโปร์ไม่ได้เป็นเจ้าของเทคโนโลยีหลักของระบบ หากสนใจจรวด MATADOR จริงๆ แล้ว ควรเจรจากับ Rafael Advanced Defence Systems จากอิสราเอลมากกว่า เพราะเป็นเจ้าของเทคโนโลยี
จรวด P-5 จากเวียดนาม	ระดับปานกลาง	ส่วนประกอบของจรวดส่วนใหญ่เวียดนามจะพึ่งพิงรัสเซีย แต่ขณะนี้รัสเซียยังมีความขัดแย้งอยู่จึงทำให้ความช่วยเหลือน่าจะหยุดชะงักหรือล่าช้าลง รัฐบาลไทยควรเผื่อระวังบริษัทของไทย เรื่องการส่งออกวัตถุดิบสำคัญไปยังเวียดนาม หากมีความเสี่ยงที่จะถูกนำไปใช้ในลักษณะที่กระทบต่อความมั่นคงของไทย
จรวด KCT-15 จากเวียดนาม	ระดับปานกลาง	หากพบว่าเวียดนามยังพัฒนาจรวดอย่างรวดเร็ว ควรจับตาความคืบหน้าอย่างใกล้ชิด และหากยกระดับเป็นภัยคุกคาม โดยเฉพาะ P-5 ที่มีระยะยิงที่ไกลและหัวรบขนาดใหญ่ ต้องเตรียมมาตรการตอบโต้ทางการทูตและการทหารต่อการใช้งานจรวดนั้น

6. ข้อเสนอแนะสำหรับไทยในการดำเนินนโยบายความมั่นคง/วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต่อแต่ละประเทศ

6.1 อินโดนีเซีย

ประเทศไทยมีความสัมพันธ์ที่ดีกับอินโดนีเซีย ซึ่งกำลังพัฒนาจรวด R-Han 122 มม. ที่มีศักยภาพสูง และมีขั้นบันไดการผลิตในระดับ 10 ซึ่งถือว่าเป็นระดับสูงสุดในภูมิภาค ไทยควรส่งเสริมความร่วมมือด้านการเมืองและการทหาร เพื่อสร้างความไว้วางใจระหว่างสองประเทศ รวมถึงสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา ร่วมในเทคโนโลยีที่ทั้งสองฝ่ายยังขาด เช่น ระบบนำวิถี หรือการผลิตร่วมเพื่อเพิ่ม Economy of Scale ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนและสร้างประโยชน์ให้กับทั้งสองฝ่าย การรับรองมาตรฐานผลิตภัณฑ์ร่วมกันจะช่วยผลักดัน

ให้ผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเข้าสู่ตลาดในระดับภูมิภาคและระดับสากลได้มากขึ้น ไทยสามารถใช้โครงการนี้เป็นตัวกลางในการเสริมสร้างบทบาทผู้นำทางนวัตกรรมในภูมิภาค

6.2 ลิงคโปร์

ลิงคโปร์มีความสัมพันธ์ที่ดีกับไทย และกำลังพัฒนาจรวด Blue Spear และ MATADOR ซึ่งมีศักยภาพสูง แต่ยังคงพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ไทยควรจับตามองโครงการนี้ไปก่อน แล้วไทยควรเจรจาเพื่อรับถ่ายทอดเทคโนโลยีจากเจ้าของเทคโนโลยี เช่น อิสราเอล พร้อมกับเสนอความร่วมมือในโครงการที่ไทยสามารถช่วยผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมป้องกันประเทศที่เกี่ยวข้องได้ แม้การคาดหวังการแบ่งปันเทคโนโลยีจากลิงคโปร์โดยตรงอาจมีข้อจำกัด แต่การแสวงหาโอกาส

ความร่วมมือทางอุตสาหกรรมป้องกันประเทศที่เกี่ยวข้องกับเรื่องอื่นๆ กับสิงคโปร์ เช่น อากาศยานไร้คนขับ หรือ ยานเกราะล้อยางจะช่วยบรรเทาบรรยากาความกังวลและความหวาดระแวงระหว่างกันได้

6.3 เวียดนาม

เวียดนามมีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับไทย และกำลังพัฒนาจรวด P-5 และ KCT-15 ซึ่งยังต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากรัสเซีย ในขณะที่สถานการณ์ความขัดแย้งระหว่างรัสเซียกับชาติตะวันตกอาจส่งผลให้การสนับสนุนดังกล่าวหยุดชะงักหรือล่าช้า ไทยควรเฝ้าระวังและจำกัดการส่งออกวัตถุดิบสำคัญที่อาจนำไปใช้ในการพัฒนาอาวุธที่ส่งผลต่อความมั่นคงของไทย หากพบว่าเวียดนามพัฒนาจรวดอย่างรวดเร็ว ควรเตรียมมาตรการตอบโต้ทางการทูตและการทหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของจรวด P-5 ซึ่งมีระยะยิงไกลและหัวรบขนาดใหญ่ ที่อาจก่อให้เกิดภัยคุกคามต่อความมั่นคงในภูมิภาค

6.4. เมียนมา

เมียนมามีความสัมพันธ์ที่ไม่ดีนักกับไทย และกำลังพัฒนาจรวด MAM-02 และ MAM-03 ที่มีศักยภาพสูงแต่ยังต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากรัสเซียเช่นกัน การพัฒนาจรวดดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของไทย เนื่องจากพิสัยการยิงสามารถเข้าถึงพื้นที่ภายในประเทศไทย ไทยควรใช้มาตรการเฝ้าระวังทางการทหารและการข่าวกรอง พร้อมเตรียมโจมตีทางไซเบอร์ต่อโครงสร้างพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับโครงการดังกล่าว เพื่อชะลอการพัฒนา นอกจากนี้ การเพิ่มการป้องกันภัยทางอากาศในพื้นที่ชายแดนและการประสานงานกับพันธมิตรในภูมิภาคจะช่วยลดความเสี่ยงต่อภัยคุกคามในระยะยาว

7. สรุปผลการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้เจาะลึกถึงขีดความสามารถกำลังรบและขีดความสามารถทางอุตสาหกรรมของโครงการพัฒนาจรวดในประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยใช้กรอบวิเคราะห์ที่เน้นการบูรณาการข้อมูลเชิงยุทธศาสตร์และอุตสาหกรรมในระดับที่ยังไม่เคยมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ นำเสนอมาก่อน งานวิจัยตั้งอยู่บนความเข้าใจถึงบริบทโลกที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ซึ่งการแข่งขันสะสมอาวุธ (Arms Race) และปรากฏการณ์ Security Dilemma ได้สร้างความไม่มั่นคงระดับภูมิภาคและกระตุ้นให้รัฐต่าง ๆ เร่งพัฒนาอาวุธที่ตอบโต้ภัยยุทธศาสตร์ของตน การศึกษานี้วิเคราะห์โครงการจรวดใน 4 ประเทศ ได้แก่ อินโดนีเซีย สิงคโปร์ เวียดนาม และเมียนมา โดยเฉพาะในแง่ของความสามารถในการพึ่งพาตนเองด้านการผลิตและผลกระทบเชิงยุทธศาสตร์ต่อภูมิภาค ผลการวิเคราะห์แบ่งโครงการจรวดออกเป็น 4 ฉากทัศน์ที่สะท้อนถึงระดับศักยภาพและความเสี่ยงต่อความมั่นคงในภูมิภาค ได้แก่ โครงการที่เป็นภัยคุกคามยุทธศาสตร์สูงสุด โครงการพัฒนาได้ไม่เต็มที่ โครงการที่พึ่งพาเทคโนโลยีต่างชาติ และโครงการความเสี่ยงต่ำ โดยในแต่ละฉากทัศน์ก็จะมีแนวทางการรับมือที่แตกต่างกันออกไป

สิ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้มีลักษณะเด่นไม่เหมือนงานวิจัยใด ๆ น่าจะเป็นเรื่องของกรอบการรวมกรอบคิดเชิงยุทธศาสตร์กำลังรบและเชิงเศรษฐศาสตร์อุตสาหกรรมเข้าไว้ด้วยกัน โดยการใช้อยู่ "แกน X และ Y" เพื่อวัดศักยภาพในสองมิติ ได้แก่ ขีดความสามารถการรบ (Combat Capabilities) ซึ่งพิจารณาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของจรวด เช่น ระยะยิง หัวรบ ความแม่นยำ ความคล่องตัว และการยิงต่อเนื่อง และขีดความสามารถทางอุตสาหกรรม (Industrial Capabilities) ที่สะท้อนความสามารถในการพึ่งพาตนเองของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศผ่านแนวคิด "บันไดการผลิต" (Ladder of Production) ซึ่งวัดความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมตั้งแต่การบำรุงรักษาขั้นพื้นฐาน จนถึงการผลิตเทคโนโลยีที่ซับซ้อนอย่างอิสระ

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ประเทศไทยควรประเมินโครงการเหล่านี้ มากไปกว่าการตอบสนองภัยคุกคามโดยตรงในทางการทหาร ไม่ว่าจะเป็นแนวคิดการป้องปราม หรือการป้องกันประเทศเท่านั้น แต่ควรแสวงประโยชน์ในการเสริมสร้างบทบาทของไทยในภูมิภาคและระดับโลก หรือเลือกที่จะบ่อนทำลายความก้าวหน้าของโครงการจรวดรอบบ้านของไทยเหล่านี้ด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น การสร้างความร่วมมือกับอินโดนีเซียในการพัฒนาระบบนำวิถีและการผลิตร่วมอาจช่วยเพิ่มศักยภาพเศรษฐกิจในภูมิภาคได้ ขณะเดียวกัน ไทยสามารถเจรจา

กับสิงคโปร์และอิสราเอลเพื่อรับการถ่ายทอดเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับจรวด Blue Spear และ MATADOR ในมิติอื่น ๆ เช่น การนำไปใช้ในงานพลเรือน นอกจากนี้ การใช้มาตรการเชิงรุก เช่น การพัฒนาระบบป้องกันภัยทางอากาศขั้นสูง หรือการโจมตีทางไซเบอร์ ในกรณีที่มีความเสี่ยงสูงจากโครงการจรวดของเมียนมา อาจช่วยสร้างดุลอำนาจของไทยในภูมิภาคอย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า โครงการพัฒนาจรวดเหล่านี้ไม่ใช่เพียงแค่เรื่องภัยคุกคามหรือโอกาสทางการทหาร แต่ยังเป็นโอกาสในการส่งเสริมเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของไทยระดับภูมิภาค การสร้างอำนาจต่อรองทางการทูต และการบูรณาการเทคโนโลยีเพื่อเสริมสร้างความยั่งยืนในระดับประเทศ งานวิจัยยังเน้นย้ำถึงความสำคัญของการจัดการความสัมพันธ์ระหว่างประเทศ ไม่ว่าจะเป็นการสร้างพันธมิตร การลดความตึงเครียด หรือแม้กระทั่งการกำหนดเงื่อนไขทางเศรษฐกิจที่ส่งเสริมความร่วมมือทางยุทธศาสตร์ แทนที่จะมองโครงการเหล่านี้ในมิติการทหารเพียงอย่างเดียว งานวิจัยนี้จึงช่วยสร้างกรอบคิดใหม่สำหรับการกำหนดนโยบายเชิงยุทธศาสตร์ของไทยที่ตอบสนองต่อความท้าทายและโอกาสในอนาคตอย่างครอบคลุมและรอบด้าน

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Suntad, "The arms race phenomenon in South East Asia: A case study of Malaysia, Singapore, and Indonesia." Ph.D. dissertation, Faculty of Political Science, Thammasat Univ., Bangkok, Thailand, 2016. [Online]. Available: https://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:138296. Accessed: Dec. 5, 2024.
- [2] International Institute for Strategic Studies (IISS), "MDI missile technology: accelerating challenges," Strategic Dossiers, 2024. [Online]. Available: <https://www.iiiss.org/publications/strategic-dossiers/mdi-missile-technology-accelerating-challenges/>. Accessed: Dec. 5, 2024.
- [3] K. Krause, Arms and the State: Patterns of Military Production and Trade. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1992. [4] "BRIN, Pindad secure seven rocket patents," Indonesia Official Portal, 2024. [Online]. Available: <https://indonesia.go.id/kategori/culture/7856/brin-pindad-secure-seven-rocket-patents?lang=2>. Accessed: Dec. 6, 2024.
- [5] Rafael Advanced Defense Systems Ltd., "SPIKE - Family of multi-purpose, tactical missiles," Dec. 2012. [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20121224064344/http://www.rafael.co.il/marketing/SIP_STORAGE/FILES/5/925.pdf. Accessed: Dec. 7, 2024.
- [6] M. Yeo, "Proteus reveals more details of Blue Spear missile," Defense News, Feb. 15, 2022. [Online]. Available: <https://www.defensenews.com/smr/singapore-airshow/2022/02/15/proteus-reveals-more-details-of-blue-spear-missile/>. Accessed: Dec. 7, 2024.
- [7] Royal Thai Navy, "Vietnam successfully produces KCT-15 anti-ship cruise missile (เวียดนาม ประสบความสำเร็จในการผลิตอาวุธปล่อยนำวิถีต่อต้านเรือผิวน้ำ แบบ KCT-15)," Office of the Naval Attaché, Royal Thai Embassy, Hanoi, May 26, 2020. [Online]. Available: https://www.attachehanoi.navy.mi.th/index.php/main/detail/content_id/3548. Accessed: Dec. 6, 2024.
- [8] T. T. Nguyen, "Accommodating the dragon: Vietnam's enduring asymmetric entanglements with China," Ph.D. dissertation, Dept. Gov. Int. Stud., Hong Kong Baptist Univ., Hong Kong, 2016. [Online]. Available: <https://scholars.hkbu.edu.hk/en/studentTheses/accommodating-the-dragon-vietnams-enduring-asymmetric-entanglemen>. Accessed: Dec. 6, 2022

การประเมินป่าในเมืองด้วยการรับรู้ระยะไกล ผ่านเทคโนโลยีอวกาศ: มวลชีวภาพและการกักเก็บคาร์บอน

ธนกฤต พิษขุนทด¹ อีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ^{2,3*}

ญาณวุฒิ อุทรักษ์^{3,4*} สาธิต แสงประดิษฐ์^{3,5} ธนเดช โรจนกุล^{2,3} วุฒิศักดิ์ บุญแน่น¹ องอาจ ญาตินิยม¹

วันที่รับ 13 สิงหาคม 2568 วันที่แก้ไข 27 สิงหาคม 2568 วันที่ตอบรับ 28 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศซึ่งขับเคลื่อนโดยการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศได้กลายเป็นความท้าทายเร่งด่วนระดับโลก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณการมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและปริมาณคาร์บอนสะสมของต้นไม้ในเขตเมือง โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ซึ่งเป็นเทคโนโลยีอวกาศร่วมกับการสำรวจภาคสนาม มีการจัดตั้งแปลงตัวอย่าง 30 แปลง ขนาด 20 x 20 เมตร เพื่อเก็บข้อมูล และคำนวณดัชนีพืชพรรณพร้อมสัดส่วนพื้นที่ปกคลุมจากข้อมูลดาวเทียม จากนั้นใช้สมการอัลโลเมตริกในการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและการกักเก็บคาร์บอน พร้อมวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและค่าดัชนีพืชด้วยสมการถดถอยเอ็กซ์โพเนนเชียล ผลการวิเคราะห์พบว่า GNDVI เป็นดัชนีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การสำรวจภาคสนามระบุมวลชีวภาพเหนือพื้นดินรวม 4,650.75 ตัน และคาร์บอน 2,185.85 ตัน ขณะที่การประเมินด้วยดาวเทียมให้ค่า 2,798.23 ตัน และคาร์บอน 1,315.17 ตัน ตามลำดับ ผลลัพธ์ยืนยันถึงประโยชน์ของการบูรณาการเทคโนโลยีอวกาศกับข้อมูลภาคสนามเพื่อการประเมินมวลชีวภาพและคาร์บอนในเขตเมืองอย่างแม่นยำ และสนับสนุนการวางแผนพื้นที่สีเขียว การจัดการทรัพยากรธรรมชาติ และการบรรเทาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

คำสำคัญ: เทคโนโลยีอวกาศ, บริการระบบนิเวศ, ป่าในเขตเมือง, มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน, ปริมาณคาร์บอนสะสม, สมการอัลโลเมตริก

¹ โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม (ฝ่ายมัธยม) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

² ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

³ ศูนย์วิจัยและปฏิบัติการก้าชกระจก คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

⁴ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

⁵ ภาควิชาภูมิสารสนเทศ คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

* ผู้แต่ง, อีเมล: teerawong@msu.ac.th, yannawut.u@msu.ac.th

Remote Sensing of Urban Forest Estimation via Space Technology: Biomass and Carbon Storage

Thanakrizzt Peebkunthod¹ Teerawong Laosuwan^{2,3*} Yannawut Uttaruk^{3,4*}
Satith Sangpradid^{3,5} Tanutdech Rotjanakusol^{2,3} Wutthisak Bunnaen¹ and Ongart Yatniyom¹

Received 13 August 2025 Revised 27 August 2025 Accepted 28 August 2025

Abstract

Climate change, largely driven by rising atmospheric carbon dioxide, presents urgent global challenges. This study estimated aboveground biomass (AGB) and carbon stock of urban trees using space technology Sentinel-2 satellite imagery from combined with field surveys. Thirty 20 × 20 m plots were established for data collection, and vegetation indices with fractional cover were derived from satellite data. Allometric equations were applied to estimate AGB and carbon stock, while exponential regression examined the relationship between biomass and vegetation indices. Results showed GNDVI as the most effective index. Field surveys indicated 4,650.75 tons of AGB and 2,185.85 tons of carbon, whereas satellite-based estimates yielded 2,798.23 tons and 1,315.17 tons, respectively. These findings demonstrate the benefits of integrating space technology with field measurements for reliable assessment of urban biomass and carbon storage. The approach provides useful insights for urban green space planning, natural resource management, and strategies to mitigate climate change.

Keywords: space technology, ecosystem services, urban forest, aboveground biomass, carbon stock

¹ Mahasarakham University Demonstration School, Mahasarakham University

² Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University

³ Greenhouse Gas Research Center and Operations, Mahasarakham University

⁴ Department of Biology, Faculty of Science, Mahasarakham University

⁵ Department of Geoinformatics, Faculty of Informatics, Mahasarakham University

* Corresponding author, E-mail: teerawong@msu.ac.th, yannawut.u@msu.ac.th

1. Introduction

At present, climate change and the increase in greenhouse gases have become major global issues, receiving significant attention worldwide [1]. One of the primary factors contributing to global warming is the emission of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere [2]. These emissions originate from various sources, including the combustion of fossil fuels in industry, transportation, and everyday energy consumption [3,4]. The rise in global temperatures has caused drastic climate changes, severely affecting biodiversity [5]. Many animal and plant species are facing habitat alterations, with some potentially becoming extinct due to their inability to adapt to rapid changes [6]. Moreover, climate change has degraded ecosystems, disrupting the natural balance essential for the survival of all living organisms [7]. In addition, rising temperatures and unpredictable weather patterns negatively affect agriculture. Previously productive cultivation may suffer from unseasonal rainfall or droughts, forcing farmers to adapt and seek new, climate-resilient crops [8]. Furthermore, global warming adversely impacts human health, increasing the incidence of heat-related illnesses and air pollution-related diseases [9].

Utilizing ecosystem services, such as urban tree planting, offers an effective means of climate change adaptation. Trees not only sequester carbon but also mitigate urban heat, enhance biodiversity, and improve air and water quality [10]. Moreover, urban trees contribute to creating a more livable environment, reducing stress, and promoting mental well-being among city residents [11]. Promoting urban tree planting is one potential

solution to climate change, and requires systematic planning and management of green spaces to maximize ecosystem service benefits provided by trees [12]. Aboveground biomass (AGB) is considered one of the most effective carbon sinks, as plants absorb atmospheric carbon dioxide and convert it into organic carbon stored within their tissues [13]. Assessing AGB and carbon sequestration in various areas enhances our understanding of the carbon storage potential of vegetation and supports the planning of sustainable natural resource management [14]. Increasing AGB also plays a role in reducing urban temperatures and creating livable environments for communities [15]. Generally, the amount of carbon stored in trees correlates directly with biomass, which represents the total mass of all tree components, including stem, branches, leaves, and roots [16]. Therefore, anatomical characteristics of trees—such as height, trunk diameter, and canopy width—can be used to estimate stored carbon using allometric equations, which establish relationships between biomass and tree structure [17].

Remote sensing powered by space technology provides an efficient method that reduces both labor and time needed for field surveys. [18,19]. This technology can be applied to assess biomass and carbon sequestration [20]. It utilizes satellite imagery and aerial photographs to analyze large areas with precision and speed, enhancing the efficiency and cost-effectiveness of surveys [21]. Furthermore, remote sensing technology can monitor long-term biomass changes and allow accurate and timely evaluation of resource management impacts and related policies.

Therefore, the study of biomass and carbon sequestration is not only academically important but also practically significant. This study aims to estimate the aboveground biomass and carbon stock of urban forests using Sentinel-2 imagery integrated with field measurements. The study provides new insights into the role of vegetation indices in urban biomass modeling and offers policy-relevant implications for green space planning and carbon credit assessment.

2. Materials and Methods

2.1 Study Area

The study area for this research on urban tree carbon stock was selected to be Mahasarakham University (Figure. 1).

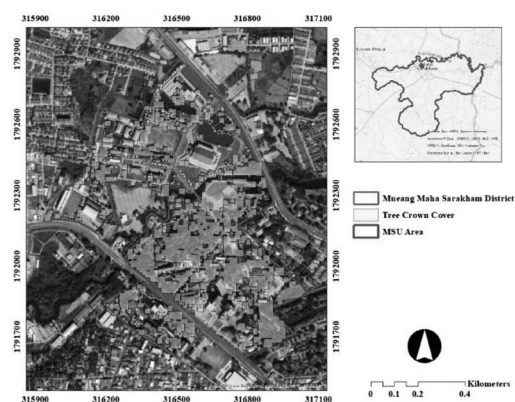


Figure 1 Study area

Mahasarakham University located in Talat Sub-district, Mueang Mahasarakham District, Mahasarakham Province, at the coordinates 3164.71.52 E and 1791741.78 N. Mahasarakham Province is characterized by generally flat to gently undulating terrain, with elevations ranging between 130 - 230 meters above sea level. The climate is classified as Tropical Monsoon

Climate. During the summer monsoon season, the province receives southwesterly monsoon winds from the Indian Ocean. The climate exhibits alternating wet and dry periods. The annual average temperature is 27.4°C, with an average minimum of 22.4°C and an average maximum of 33.7°C. April is typically the hottest and most humid month of the year.

2.2 Field data collection

Field data collection involved identifying tree species and measuring the dimensions of all trees with a diameter at breast height (DBH), measured at 1.30 meters above the ground, greater than 4.5 centimeters. Data were collected from 30 sample plots, each measuring 20 × 20 meters. DBH was measured using a diameter tape, and tree height (H) was measured using a laser rangefinder. Tree growth analysis focused on two primary parameters: DBH and height (H), which provide essential insights into various aspects of tree development. Upon obtaining growth data, aboveground biomass (AGB) was calculated using allometric equations (Equation 1) [22], which convert growth metrics into biomass estimates. Following this, AGB values were utilized to calculate carbon stock through Equation 2. To assess carbon stock, we transformed the AGB into carbon stock by applying the IPCC's suggested default wood carbon factor of 0.47, which signifies that 47% of the dry mass of all above-ground tree parts is composed of [23]. The application of allometric equations and carbon estimation is a critical process for understanding the environmental contribution of urban trees.

$$\begin{aligned}
W_S &= 0.0396(D^2H)^{0.933} \\
W_B &= 0.00349(D^2H)^{1.030} \\
W_L &= \left(\frac{28}{W_S + W_B} + 0.025 \right)^{-1} \\
W_T &= W_S + W_B + W_L
\end{aligned} \tag{1}$$

D denotes the diameter at breast height (cm), H the tree height (m), W_S the stem biomass (t/ha), W_B the branch biomass (t/ha), and W_L the leaf biomass (t/ha)

$$C_j = W_{tc} \times FC \tag{2}$$

C_j denotes the carbon storage potential of a tree (kg), W_{tc} represents the aboveground biomass (kg), and FC is the carbon fraction of biomass, fixed at 0.47.

2.3 Satellite Data Analysis

Sentinel-2 imagery obtained on October 4, 2024, was employed in this study to compute vegetation indices, namely the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [24] and the Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) [25], using the formulas in Equations 3 and 4. These indices were then used to derive the Fractional Green Vegetation Cover (FC) as defined in Equation 5 [26]. The use of vegetation indices is particularly valuable in assessing vegetation status, including tree density and overall health of vegetated areas.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \tag{3}$$

The widely recognized NDVI is a straightforward yet powerful index for measuring green vegetation. It compares the scattering of green leaves in the Near Infrared spectrum with the absorption of

chlorophyll in the red spectrum. The NDVI values range from -1 to 1. Negative NDVI values (approaching -1) are indicative of water bodies. Values near zero (-0.1 to 0.1) typically represent barren landscapes such as rock, sand, or snow. Low positive values suggest the presence of shrub and grassland (approximately 0.2 to 0.4), while high values signify temperate and tropical rainforests (values nearing 1).

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \tag{4}$$

The Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) measures the greenness and photosynthetic activity of plants. It is a commonly utilized vegetation index for assessing water and nitrogen absorption within the crop canopy. The index values range from -1 to 1, where values between -1 and 0 indicate the presence of water or bare soil. This index is primarily applied during the intermediate and final stages of the crop growth cycle.

$$FC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} + NDVI_{soil}} \tag{5}$$

Fractional Green Vegetation Cover (FC) serves as a crucial parameter in climate modeling. Remote sensing technology has emerged as one of the most efficient methods for obtaining information on vegetation dynamics. The model presumes that a given pixel is composed of green vegetation and bare soil, leading to the conclusion that the NDVI value is a linear combination of $NDVI_{veg}$ and $NDVI_{soil}$. Typically, $NDVI_{veg}$ is identified as the highest NDVI [27], while $NDVI_{soil}$ is derived from the lowest NDVI observed in the scene (Yang et al.,

2006). Numerous studies reference commonly accepted NDVIsoil values of 0.05 or lower [28]. Nevertheless, images are often affected by noise, which means that the maximum and minimum NDVI values in an image may not accurately represent NDVIveg and NDVIsoil.

2.4 Correlation Analysis

The relationship between Fractional Green Vegetation Cover (FC) and AGB density was examined through an exponential regression model, which proves to be efficient in estimating biomass using Sentinel-2 satellite data. The standard equation format is presented in Equations 6.

$$AGB = a \times b^{e \times FC} \quad (6)$$

The constants a and b are established based on field data and vegetation indices. The analysis indicated that biomass generally increases exponentially as vegetation cover rises.

2.5 Statistical Validation Using Root Mean Square Error (RMSE)

In order to present a succinct overview of this study, the methodology is outlined in a series of sequential steps as detailed below. This research centers on the examination of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) through the utilization of monthly data obtained from Terra/MODIS satellite imagery. The first step entails the computation of the raw NDVI values as defined by Equation 1, followed by multiplying the results by 0.0001 to obtain more accurate values. After calculating the NDVI values, the coordinates are transformed to the WGS 1984 UTM Zone 47N system to ensure precision in map location. Subsequently, the

study employs conditional sampling to select the largest cultivated areas of four types of economic crops: rice fields, fruit trees, perennial trees, and field crops.

This sampling approach prioritizes large areas to facilitate data analysis and efficiently monitor changes in cultivated areas. The sampling process is conducted for each district in Nong Bua Lam Phu Province, ultimately leading to the creation of graphs that display the NDVI values derived from this analysis. The accuracy of the biomass estimation model was evaluated using Root Mean Square Error (RMSE) (Equation 7), which quantifies the deviation between predicted and observed values. RMSE is calculated by taking the square root of the mean of the squared differences between the model's predicted values and actual field measurements. A lower RMSE indicates higher model accuracy and lower prediction error. In this case study, where AGB was estimated using satellite-derived vegetation indices, RMSE serves as an important metric to assess model reliability and improve its accuracy based on the available data. Therefore, RMSE plays a vital role in validating the model's predictive performance.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (AGB_{pred} - AGB_{obs})^2} \quad (7)$$

AGB_{pred} represents the estimated biomass value derived from the vegetation index, while refers to the biomass value obtained from field data, with n indicating the number of samples.

3. Results and Discussions

3.1 Analysis of Tree Physical Characteristics

Field surveys were conducted from October 4 to 5, 2024, during the late rainy season, which provided optimal conditions for efficient field data collection. Key measurements recorded included diameter at breast height (DBH) and tree height (H), along with the use of Global Positioning System (GPS) to record the location of each sample plot. The AGB was calculated using allometric equations, and the results are presented in Table 1. This

variation emphasizes the key role of large trees in overall biomass accumulation and highlights the structural diversity that must be considered in urban forest assessments. Such heterogeneity provides essential context for accurate biomass estimation and carbon stock evaluation. In particular, differences in canopy structure and species composition can significantly influence biomass distribution across plots. These factors reinforce the need for site-specific approaches when applying remote sensing or modeling techniques to urban forest ecosystems.

Table 1 Aboveground biomass

Plot	Mean DBH	Mean H	Sum of Aboveground biomass in branch part (kg)	Sum of Aboveground biomass in stem part (kg)	Sum of Aboveground biomass in leaf part (kg)	Sum of all above ground biomass (kg)	Sum of all above ground biomass (ton/400m ²)	Sum of all above ground biomass (ton/ha)
01	21.23	7.23	235.08	1,156.81	49.72	1,441.61	1.44	36.04
02	21.69	5.43	1,079.90	3,949.66	179.64	5,209.20	5.21	130.23
03	22.36	8.23	271.52	1,338.01	57.49	1,667.02	1.67	41.68
04	19.78	7.94	310.43	1,501.53	64.73	1,876.69	1.88	46.92
05	38.48	12.00	1,439.85	5,754.56	256.95	7,451.36	7.45	186.28
06	35.65	10.67	476.37	2,043.86	90.01	2,610.25	2.61	65.26
07	37.40	14.13	1,104.23	4,421.06	197.34	5,722.63	5.72	143.07
08	28.46	10.60	489.38	2,206.36	96.29	2,792.02	2.79	69.80
09	67.48	21.75	2,032.66	7,474.00	339.53	9,846.19	9.85	246.15
10	65.49	17.50	2,023.25	7,208.00	329.69	9,560.95	9.56	239.02
11	58.09	19.50	2,958.65	11,109.71	502.45	14,570.81	14.57	364.27
12	31.19	10.14	600.32	2,424.50	108.04	3,132.86	3.13	78.32
13	7.79	5.74	48.15	271.45	11.43	331.03	0.33	8.28
14	22.18	8.89	456.61	1,939.73	85.59	2,481.94	2.48	62.05
15	35.57	10.25	870.19	3,120.51	142.53	4,133.22	4.13	103.33
16	30.74	13.00	1,181.44	5,036.95	222.10	6,440.48	6.44	161.01
17	14.26	7.21	291.33	1,356.14	58.86	1,706.33	1.71	42.66
18	29.33	10.43	1,116.56	4,031.71	183.87	5,332.14	5.33	133.30
19	27.25	12.13	2,817.58	9,878.23	453.44	13,149.25	13.15	328.73
20	28.03	10.50	905.27	3,824.41	168.93	4,898.61	4.90	122.47
21	87.54	21.00	1,842.89	6,350.37	292.62	8,485.88	8.49	212.15
22	17.54	6.91	113.09	595.72	25.32	734.13	0.73	18.35

Table 1 Aboveground biomass

Plot	Mean DBH	Mean H	Sum of Aboveground biomass in branch part (kg)	Sum of Aboveground biomass in stem part (kg)	Sum of Aboveground biomass in leaf part (kg)	Sum of all above ground biomass (kg)	Sum of all above ground biomass (ton/400m ²)	Sum of all above ground biomass (ton/ha)
23	16.64	7.00	104.51	554.43	23.54	682.49	0.68	17.06
24	54.37	13.20	1,442.02	5,300.96	240.83	6,983.80	6.98	174.60
25	32.20	11.50	700.38	2,761.89	123.66	3,585.93	3.59	89.65
26	43.99	9.80	587.15	2,422.83	107.50	3,117.48	3.12	77.94
27	127.32	15.00	1,231.16	4,195.18	193.80	5,620.14	5.62	140.50
28	25.46	9.77	876.49	3,972.19	173.19	5,021.87	5.02	125.55
29	32.07	8.13	359.79	1,643.35	71.55	2,074.69	2.07	51.87
30	20.51	7.29	213.80	1,085.46	46.41	1,345.68	1.35	33.64
Mean	-	-	-	-	-	-	-	118.34
SD	-	-	-	-	-	-	-	90.14
Variance	-	-	-	-	-	-	-	8125.77

The variation in the AGB among plots reflects differences in tree size and structure. Plot 19 and Plot 21 recorded unusually high biomass values, mainly due to the presence of large-diameter and tall trees, which strongly influence the allometric equations applied for estimation. Since DBH and height act as exponential factors in biomass models, a few large individuals can significantly raise the total biomass within a plot. This relationship confirms that tree size remains a reliable predictor of AGB and validates the accuracy of the chosen equations.

These findings emphasize the role of plot-level heterogeneity in shaping carbon storage potential. Mature trees not only increase

biomass but also provide valuable ecosystem services such as shading, temperature regulation, and long-term carbon sequestration. In contrast, plots with lower biomass may represent younger stands requiring targeted management.

3.2 Satellite Data Analysis

The results of satellite data analysis using Sentinel-2 were based on three main types of vegetation indices: NDVI, and GNDVI, as illustrated in Figure 2–3 and summarized in Table 2. The analysis revealed clear variations in index values across plots, reflecting differences in canopy density and vegetation vigor. These variations provided the basis for establishing regression relationships with AGB and carbon stock.

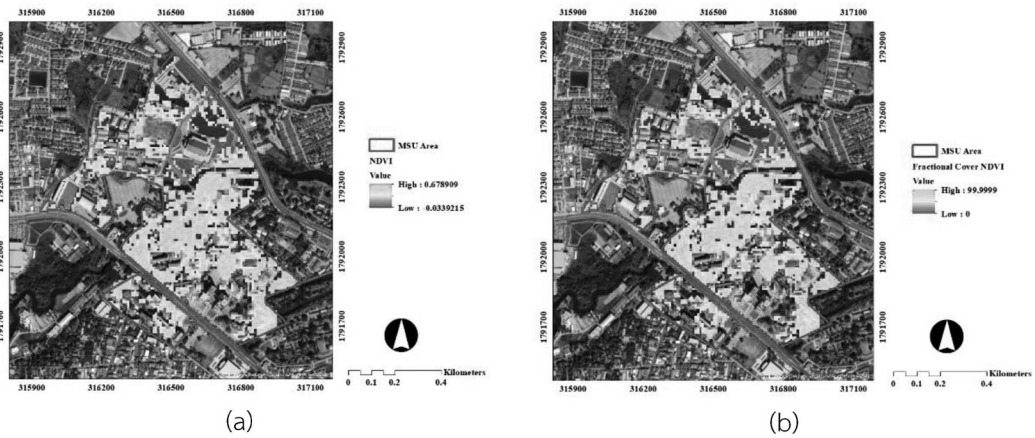


Figure 2 Satellite data analysis (a) NDVI and (b) NDVI-derived Fractional Cover

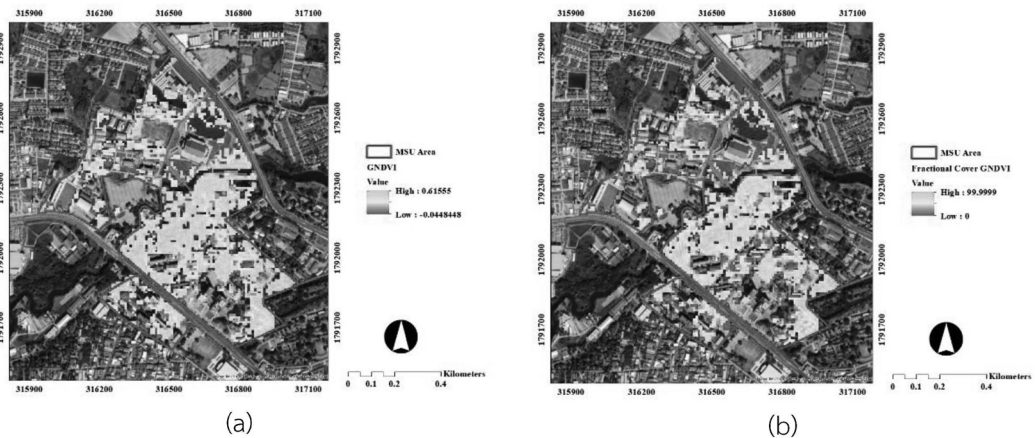


Figure 3 Satellite data analysis (a) GNDVI and (b) GNDVI-derived Fractional Cover

The details can be described as follows: Figure 2 (a) presents NDVI values, with a minimum of -0.0339215 and a maximum of 0.678909, while Figure 2 (b) shows the NDVI-derived Fractional Cover, representing the proportion of green vegetation cover, with values ranging from

0.0000 to 99.9999. Figure 3 (a) displays GNDVI values ranging from -0.0448448 to 0.61555 within the Mahasarakham University (MSU) area, which is outlined in red. Figure 3 (b) illustrates the GNDVI-derived Fractional Cover, also ranging from 0.0000 to 99.9999 within the same area.

Table 2 Fractional Cover

Sample Plot	Fractional Cover NDVI	Fractional Cover GNDVI
1	61.15	48.62
2	69.17	58.15
3	75.91	65.02
4	73.43	64.29
5	67.17	55.91
6	75.20	66.05
7	64.97	51.54
8	57.75	45.84
9	77.01	69.48
10	73.56	64.39
11	58.19	46.17
12	72.68	63.83
13	84.75	77.76
14	75.60	68.10
15	76.37	67.60
16	41.81	32.78
17	82.75	74.08
18	79.07	71.33
19	83.27	76.89
20	80.99	73.68
21	42.54	32.93
22	84.97	74.92
23	87.21	83.20
24	66.64	56.92
25	45.91	37.92
26	69.82	61.19
27	82.61	72.73
28	74.54	67.04
29	63.15	49.50
30	74.29	67.07

Table. 2 presents the Fractional Cover values for all 30 sample plots using various greenness indices, including NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), and GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), to evaluate vegetation and associated soil conditions. From the analysis of the data in Table. 2, several patterns can be observed in the Fractional Cover values for each index, as follows:

NDVI: The average NDVI values ranged approximately from 41.81 to 87.21, with a mean value around 71.10, indicating a relatively high level of vegetation greenness across many plots.

GNDVI: The average GNDVI values ranged from approximately 32.78 to 83.20, with a mean of about 61.10, which is slightly lower than NDVI and shows a distribution pattern similar to NDVI.

The relationship among the indices—NDVI, and GNDVI—shows a similar distribution pattern, with GNDVI generally yielding slightly lower values compared to NDVI. This may indicate differences in how each index emphasizes the measurement of vegetation greenness. Plots with high Fractional Cover values, such as Plots 23, 19, and 22, suggest areas with lush vegetation

and healthy plant conditions. Conversely, Plots 16 and 21 represent examples of plots with low Fractional Cover values across all indices, which may be due to factors such as poor tree health or water deficiency. The importance of using multiple indices lies in enhancing the comprehensiveness of the analysis, as each index focuses on different aspects. Integrating data from multiple indices provides a more complete and clearer picture of the environmental conditions.

3.3 Correlation Analysis

From the analysis of the relationship between Fractional Cover (FC) and AGB using exponential regression, the results are presented in Figure. 4 (a) and (b). An analysis of the relationship between AGB density and fractional cover (FC) using exponential regression revealed that NDVI, and GNDVI have coefficients of determination (R^2) of 0.6186, and 0.7201, respectively. Notably, GNDVI exhibited the highest correlation with an R^2 value of 0.7201, and the resulting equation is $y = 3.9972e^{0.0533x}$. This equation indicates that the variability of AGB can be significantly explained by the FC calculated from GNDVI at a high level.

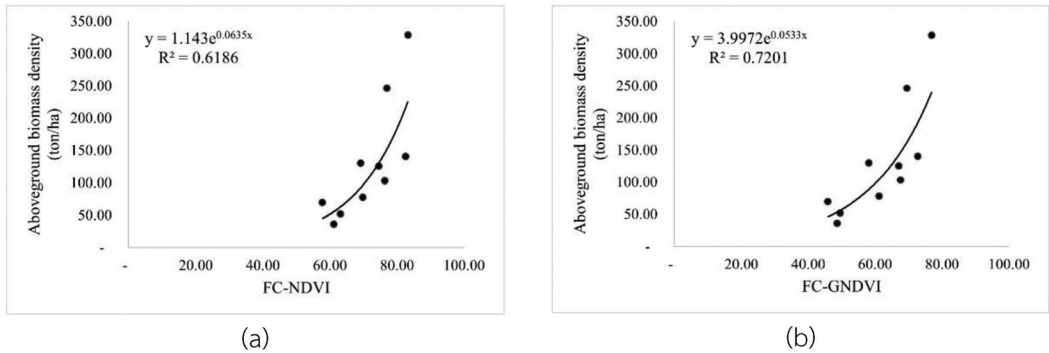


Figure 4 Correlation analysis (a) FC-NDVI, and (b) FC-GNDVI

3.4 AGB Estimation

The AGB and carbon stock estimations derived from vegetation indices using exponential regression were calculated on a per-pixel basis. This was done by multiplying the biomass density per hectare by the area of one pixel

(100 square meters), and then dividing by 10,000 square meters to convert the values to per-pixel units. The resulting raster layers represent biomass per pixel, as illustrated in Figure. 5 (a) and (b).

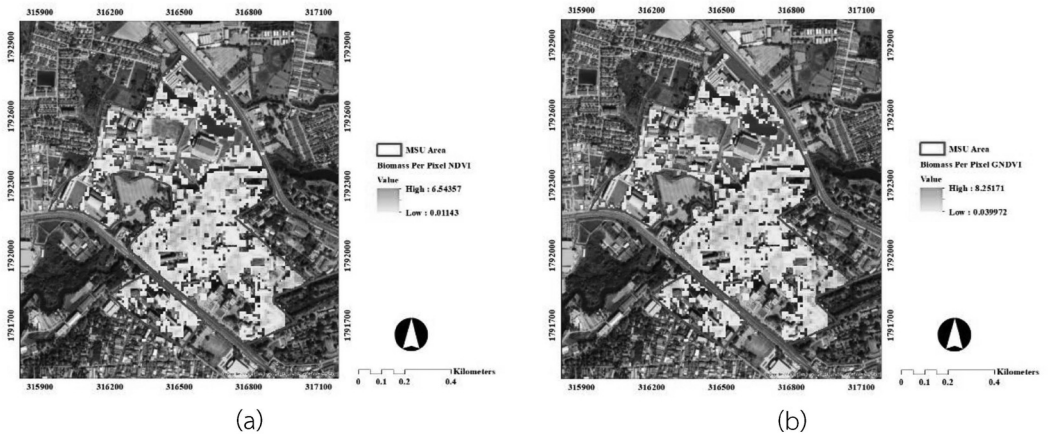


Figure 5 Aboveground biomass (a) FC-NDVI, and (b) FC-GNDVI

From Figure. 5 (a), the NDVI-based estimation shows that the maximum biomass in a 100 square meter area was 6.54357 tons, while the minimum was 0.01143 tons. The total biomass estimated from NDVI was 2,558.1196 tons. Figure.5 (b), presents the GNDVI-based estimation, with the highest biomass in a 100 square meter area being 8.25171 tons and

the lowest 0.039972 tons. The total biomass calculated from GNDVI was 2,798.2262 tons. These results derived from NDVI, and GNDVI provide detailed and effective insights into the distribution and quantity of AGB within the study area. The results of carbon stock derived from vegetation indices are illustrated in Figure. 6 (a) – (b).

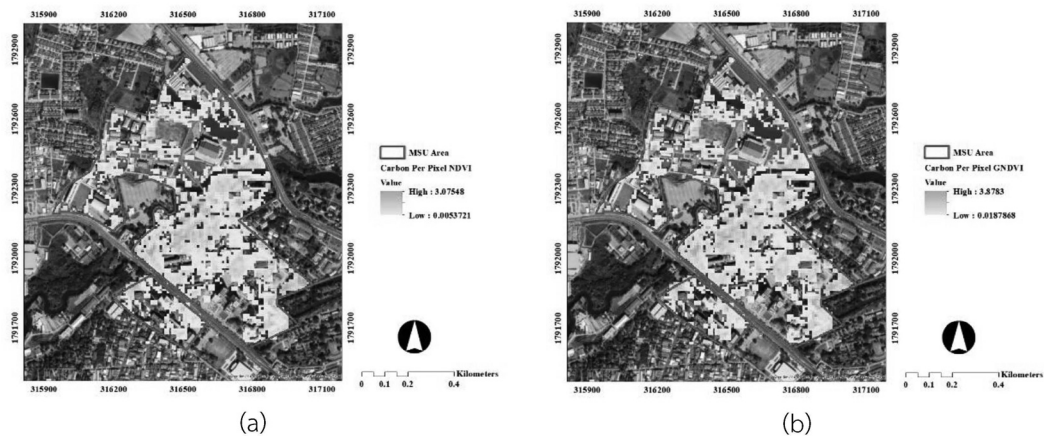


Figure 6 Carbon per pixel (a) NDVI, and (b) GNDVI

Figure. 6 (a) presents the NDVI-based carbon stock. In a 100 square meter area, the maximum amount of sequestered carbon was 3.07548 tons of carbon, while the minimum was 0.0053721 tons of carbon. The total amount of carbon stock based on NDVI was 1,202.316209 tons of carbon. Figure.6 (b) shows the GNDVI-based carbon stock. The highest amount of carbon sequestered in a 100 square meter area was 3.8783 tons of carbon, and the lowest was 0.00187868 tons of carbon. The total amount of carbon sequestered from GNDVI was 1,315.166321 tons of carbon. Figure.6 (b) shows the GNDVI-based carbon stock. The highest amount of carbon sequestered in a 100 square meter area was 3.8783 tons of carbon, and the lowest was 0.00187868 tons of carbon. The total amount of carbon sequestered from GNDVI was 1,315.166321 tons of carbon.

3.6 Statistical Accuracy Assessment

The results of the Root Mean Square Error (RMSE) and RMSE% calculations for evaluating the accuracy of biomass density estimates derived from satellite imagery compared with values obtained from field surveys are as follows:

NDVI: Based on the data analysis, the RMSE value calculated for NDVI was 2.36 tons per hectare (ton/ha), indicating that, on average, the satellite-derived biomass values deviated from the field-based measurements by approximately 2.36 ton/ha. Additionally, the RMSE percentage (RMSE%) was calculated to be 44.99%, representing the percentage error relative to the actual field values.

GNDVI: The RMSE value calculated for GNDVI was 1.90 tons per hectare (ton/ha), which means that, on average, the satellite-derived values deviated from the field measurements by approximately 1.90 ton/ha. The corresponding RMSE% was 36.21%, indicating the percentage error relative to the actual values.

The relatively high RMSE% observed in this study—44.99% for NDVI and 36.21% for GNDVI—can be attributed to several factors inherent to both urban forest characteristics and the data source. First, urban plots exhibit structural heterogeneity, with diverse species, size classes, and canopy densities, which complicates the performance of single-index models calibrated on limited plot samples. Second, the 10 m spatial

resolution of Sentinel-2 often produces mixed-pixel effects, where individual pixels combine tree canopies with impervious or understory surfaces, thereby introducing systematic bias in spectral indices. Third, slight mismatches between plot boundaries and satellite footprints, along with phenological and management differences, further contribute to residual error. Previous studies have reported similarly high RMSE values when relying solely on Sentinel-2 indices, whereas the integration of canopy-height or LiDAR information has been shown to substantially reduce error, underscoring the importance of multi-source data integration. Therefore, future research should (i) stratify models according to vegetation type and structural characteristics, (ii) incorporate canopy-height metrics derived from UAV or LiDAR, and (iii) employ cross-validation approaches to more accurately characterize model generalization error.

4. Conclusion

This study assessed aboveground biomass and carbon stock of urban trees at Mahasarakham University by integrating Sentinel-2 imagery with field surveys. Results showed that GNDVI was the most effective vegetation index, demonstrating a strong correlation with biomass estimation. Field surveys indicated a total biomass of 4,650.75 tons and carbon stock of 2,185.85 tons, while satellite-based analysis estimated 2,798.23 tons of biomass and 1,315.17 tons of carbon. These findings highlight the value of combining space technology with ground measurements to provide accurate and scalable assessments of urban forest carbon potential. From a practical perspective, the results can inform urban green

space planning by identifying high-biomass areas for conservation and management. Moreover, the quantified carbon stock provides baseline data for evaluating urban carbon credit opportunities. Future research should explore higher-resolution data, such as UAV or LiDAR, and expand the number of sample plots to further improve model accuracy and support evidence-based policies on climate change mitigation.

5. Acknowledgement

This research project was financially supported by Mahasarakham University.

6. Reference

- [1] A. T. Arevalo, "Climate change versus economic growth: Case of greenhouse apply a study of European Union countries and England from 2010 to 2019 using linear regression and neural networks," *Sustainability*, vol. 16, no. 5, Feb. 2024, Art. no. 1884.
- [2] M. Zubair, S. Chen, Y. Ma, and X. Hu, "A systematic review on carbon dioxide (CO₂) emission measurement methods under PRISMA guidelines: Transportation sustainability and development programs," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, Mar. 2023, Art. no. 4817.
- [3] T. Angkahad, W. Chokkuea, S. Sangpradid, Y. Uttaruk, K. Viriyasatr, and T. Laosuwan, "The assessment of aboveground biomass and carbon sequestration in community forests using UAV technology," *Def. Technol. Acad. J.*, vol. 7, no. 15, pp. 11–28, Jan.–Apr. 2025.

- [4] Y. Uttaruk and T. Laosuwan, "Methods of estimation for above ground carbon stock in Nongbua-nonmee community forest, Maha Sarakham Province, Thailand," *Agric. For.*, vol. 66, no. 1, pp. 183-195, 2020.
- [5] M. G. Muluneh, "Impact of climate change on biodiversity and food security: A global perspective—a review article," *Agric. Food Secur.*, vol. 10, Oct. 2021, Art. no. 36.
- [6] United Nations, "Biodiversity - our strongest natural defense against climate change," n.d. [Online]. Available: <https://www.un.org/en/climatechange/science/climate-issues/biodiversity>. Accessed: May 2, 2025.
- [7] U.S. Environmental Protection Agency, "Climate change impacts on ecosystems," n.d. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/climateimpacts/climate-change-impacts-ecosystems>. Accessed: May 3, 2025.
- [8] X. Yuan et al., "Impacts of global climate change on agricultural production: A comprehensive review," *Agronomy*, vol. 14, no. 7, Jun. 2024, Art. no. 1360.
- [9] M. S. Ragettli et al., "Explorative assessment of the temperature–mortality association to support health-based heat-warning thresholds: A national case-crossover study in Switzerland," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 20, no. 6, Mar. 2023, Art. no. 4958.
- [10] V. Heidt and M. Neef, "Benefits of urban green space for improving urban climate," in *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests*, M. M. Carreiro, Y. C. Song, and J. Wu, Eds. New York, NY, USA: Springer, 2008, pp. 84-96.
- [11] A. Woodward et al., "Trees, climate change, and health: An urban planning, greening and implementation perspective," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 20, no. 18, Sep. 2023, Art. no. 6798.
- [12] Z. Rehman et al., "Urban parks and nativetrees: A profitable strategy for carbon sequestration and climate resilience," *Land*, vol. 14, no. 4, Apr. 2025, Art. no. 903.
- [13] W. Vattanavongsiri, S. Sangpradid, W. Chokkuea, and T. Laosuwan, "Estimation of above-ground carbon sequestration in the national reserved forest using vegetation indices and gradient boosting machine learning," *Int. J. Tech. Phys. Probl. Eng.*, vol. 16, no. 3, pp. 361-366, Sep. 2023.
- [14] P. Saengpradit, S. Sangpradid, and T. Laosuwan, "Estimation of aboveground biomass using hybrid machine learning based on satellite imagery," *Int. J. Tech. Phys. Probl. Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 7-13, Dec. 2024.
- [15] M. M. Rahman and J. Hasan, "Evaluating the impact of green spaces on urban heat reduction in Rajshahi, Bangladesh using the InVEST model," *Land*, vol. 13, no. 8, Aug. 2024, Art. no. 1284.
- [16] T. Laosuwan, Y. Uttaruk, S. Nakapan, J. Itsarawisut, and C. Plybour, "Evaluation of tree biomass and carbon sequestration through remote sensing and field methods," *Geogr. Tech.*, vol. 20, no. 1, pp. 33-43, Mar. 2025.
- [17] K. Al-Jabri et al., "Integrating remote sensing techniques and allometric models for sustainable carbon sequestration trees," *Sustainability*, vol. 17, no. 1, Jan. 2025, Art. no. 123.

- [18] T. Rotjanakusol, S. Sangpradid, J. Itsarawisut, and T. Laosuwan, "Estimation of land surface temperature by derivative analysis of MOD11A2 product data, MODIS system," *Def. Technol. Acad. J.*, vol. 2, no. 6, pp. 76-85, Jul.-Dec. 2020.
- [19] T. Angkahad et al., "An empirical analysis of aboveground biomass and carbon sequestration using UAV photogrammetry and machine learning techniques," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 186740-186752, 2024.
- [20] T. Angkahad et al., "Developing a drone-based machine learning for spatial modeling and analysis of biomass and carbon sequestration in forest ecosystems," *ES Eng. Sci.*, vol. 35, 2025, Art. no. 1508.
- [21] S. Ullah et al., "Multi-temporal and multi-resolution RGB UAV surveys for cost-efficient tree species mapping in an afforestation project," *Remote Sens.*, vol. 17, no. 6, Mar. 2025, Art. no. 949.
- [22] H. Ogawa, K. Yoda, K. Ogino, and T. Kira, "Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand: II. Plant biomass," *Nat. Life Southeast Asia*, vol. 4, pp. 49-80, 1965.
- [23] IPCC, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe, Eds. Kanagawa, Japan: IGES, 2006
- [24] C. J. Tucker, "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation," *Remote Sens. Environ.*, vol. 8, no. 2, pp. 127-150, May 1979.
- [25] A. A. Gitelson, Y. J. Kaufman, and M. N. Merzlyak, "Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS," *Remote Sens. Environ.*, vol. 58, no. 3, pp. 289-298, Dec. 1996.
- [26] T. Laosuwan and P. Uttarak, "Estimating tree biomass via remote sensing, MSAVI 2, and fractional cover model," *IETE Tech. Rev.*, vol. 31, no. 5, pp. 362-368, Sep. 2014.
- [27] H. Yang and Z. Yang, "A modified land surface temperature split window retrieval algorithm and its applications over China," *Global Planet. Change*, vol. 52, no. 1-4, pp. 207-215, Jul. 2006.
- [28] GM. Gebremichael and A. P. Barros, "Evaluation of MODIS gross primary productivity (GPP) in tropical monsoon regions," *Remote Sens. Environ.*, vol. 100, no. 1, pp. 150-166, Jan. 2006.

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของสะพานโลหะสำหรับรถสะพานเครื่องหนูน้ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

อชิรฤกษ์ จุลนิพิฐวงษ์^{1*} วรณชพัฒน์ ฤทธิ์เลื่อน¹ อรรถพล เจริญผล¹ และชานนทร์ เล็กอึ้ง¹

วันที่รับ 27 พฤษภาคม 2568 วันที่แก้ไข 17 กันยายน 2568 วันตอบรับ 23 กันยายน 2568

บทคัดย่อ

รถสะพานเครื่องหนูน้ (Modular Fast Bridge Launching Vehicle) เป็นยุทธโปกรณ์ทางทหารที่ใช้ในการปฏิบัติการกิจสนับสนุนทางยุทธวิธี เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายยานพาหนะ ยุทธโปกรณ์หรือกำลังพลข้ามคลองหรือเส้นทางที่ถูกตัดขาด นอกจากนี้ยังใช้ในการบรรเทาสาธารณภัย เพื่อช่วยเหลือประชาชนในกรณีเส้นทางคมนาคมถูกตัดขาด งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์และพฤติกรรมความแข็งแรงของสะพานโลหะด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์พฤติกรรมของความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนประกอบต่างๆ ของสะพานที่ติดตั้งบนสะพาน นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบความเครียดความเค้น และระยะโก่งตัวที่เกิดขึ้นบริเวณกลางสะพานที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขและการทดสอบสะพานโลหะด้วยการวางน้ำหนักประมาณ 60 ตันลงบนสะพาน จากผลการคำนวณและผลการทดสอบพบว่า ผลการคำนวณและผลการทดสอบมีความสอดคล้องกัน และพบว่าเกิดความเค้นสูงสุดบริเวณกึ่งกลางสะพาน บริเวณที่สะพานทั้ง 2 ผังมาประกบกัน

คำสำคัญ: สะพานโลหะ, รถสะพานเครื่องหนูน้, ยุทธโปกรณ์ช่วยรบทางทหาร

¹ ส่วนงานวิศวกรรมยานรบ, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: achirakris.j@dti.or.th

Strength Analysis of a Metal Bridge for the Modular Fast Bridge Launching Vehicle Using the Finite Element Method

Achirakris Julniphitwong^{1*} Watchaphat Ridluan¹ Attapon Charoenpon¹ and Chanon Lekthamrong¹

Received 27 May 2025 Revised 17 September 2025 Accepted 23 September 2025

Abstract

The Modular Fast Bridge (MFB) is military equipment used for tactical support missions, enabling the transport of vehicles, equipment, or personnel across canals or disrupted routes. Additionally, it is utilized in disaster relief operations to assist civilians when transportation routes are cut off. This study presents a strength analysis of a steel bridge capable using the Finite Element Method (FEM). The analysis focuses on evaluating the stress and strain of the bridge structure. Furthermore, the strength of steel bridge was tested by placing 60-ton load on the middle of the bridge and the tested results were used to compare against the results obtained from FEM. The results from the calculations and experiments showed that both were in good agreement, and the maximum stress occurred at the midpoint of the bridge, where the two bridge sections are connected.

Keywords: metal bridge, modular fast bridge, launcher combat support vehicle

¹ Military Vehicle Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author: achirakris.j@dti.or.th

1. บทนำ

ปัจจุบันการวิจัยและพัฒนาอุทโธปกรณ์ให้มีความเหมาะสมสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมและภัยคุกคามกำลังได้รับความสนใจและมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามการเตรียมความพร้อมต่อสถานการณ์ทุกรูปแบบนั้นไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการพัฒนาอุทโธปกรณ์หลักที่ใช้ในสนามรบ เช่น ยานเกราะล้อยาง อากาศยานไร้คนขับ และเรือรบ เป็นต้น แต่รวมถึงการวิจัยและพัฒนาอุทโธปกรณ์ช่วยรบหรือสิ่งก่อสร้างเพื่อส่งกำลังพลเข้าสู่พื้นที่รบ เช่น รถสะพานเครื่องหนูนม (Modular Fast Bridge Launching Vehicle) เป็นต้น สะพานทหารยังมีประโยชน์อื่นนอกเหนือจากการใช้งานทางทหาร เช่น ในกรณีที่เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติเป็นเหตุให้เส้นทางคมนาคมถูกตัดขาด ทหารช่างสามารถใช้สะพานทหารในการเข้าไปแก้ปัญหาเชื่อมต่อเส้นทางสัญจร ช่วยประชาชนที่เดือดร้อนจากเหตุฝนตกหนักจนถนนถูกตัดขาด สามารถบรรเทาความเดือดร้อนแก่ผู้ประสบภัยได้

สะพานโลหะเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงสร้างพื้นฐานทางวิศวกรรมของระบบรถสะพานเครื่องหนูนมที่ใช้ในการสนับสนุนการเคลื่อนย้ายกำลังพลและอุทโธปกรณ์ทางทหาร โครงสร้างสะพานต้องได้รับการออกแบบให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะสามารถรองรับภาระกรรมของยานพาหนะทางทหารที่มีน้ำหนักสูง เช่น ยานรบสายพานที่มีน้ำหนัก 60 ตัน (MLC 60)

สะพานดังกล่าวยังไม่มีการใช้งานแพร่หลายในประเทศ ตลอดจนถึงองค์ความรู้ในการใช้งานโครงเหล็กสำหรับอุทโธปกรณ์ข้ามลำน้ำในประเทศ ณ ปัจจุบันยังมีอยู่น้อยมาก ทั้งในด้านการวิเคราะห์ การออกแบบ และการผลิตโครงสร้าง

2. การทบทวนวรรณกรรม

ปัจจุบันสะพานเครื่องหนูนมที่มีใช้ในการปฏิบัติการกิจสนับสนุนหน่วยทางยุทธวิธีและใช้ในการช่วยเหลือประชาชน บางชนิดมีข้อจำกัดรับน้ำหนัก รวมทั้งใช้กำลังพลและเวลาในการประกอบสร้างนาน ไม่ทันต่อความต้องการด้านปัจจัยเวลา งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมความแข็งแรงของสะพานที่ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะเป็นโมดูลาร์

โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโครงสร้าง โดยมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

Zienkiewicz et al. [1] ได้พัฒนาพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างที่ซับซ้อนได้

Yang et al. [2] ได้วิเคราะห์ความแข็งแรงและปรับปรุงโครงสร้างของสะพานเหล็กแบบโครงถักโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้สามารถรองรับน้ำหนักได้สูงสุด

Embaby et al. [3] ได้วิเคราะห์เชิงตัวเลขและทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างสะพานเหล็กแบบโครงถักคู่ยาว 45.7 เมตร การทดลองได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความแข็งแรงบนสะพานเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงที่กระทำ การโก่งตัว และความเครียด

วินัฐ อินทรสุวรรณ และคณะ [4] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาสร้างสะพานทหารช่างของกองทัพบก โดยได้จำลองและวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างสะพานที่สามารถรองรับน้ำหนักรถถังสายพานหนัก 60 ตัน กระทำที่กึ่งกลางสะพาน และน้ำหนักแรงเฉือน การแอ่นตัว และความเค้น มาเปรียบเทียบกับผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุโครงสร้างสะพาน เพื่อหาวัสดุทดแทนที่เหมาะสมในประเทศ นอกจากนี้ยังจำลองข้อต่อสะพานทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงของข้อต่อและเปรียบเทียบผลกับการคำนวณ

Hornbeck [5] ได้นำเสนอมาตรฐานการออกแบบและทดสอบสะพานทางทหาร เพื่อใช้ออกแบบสะพานทางทหารหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการข้ามเส้นทางที่ถูกตัดขาด

ณัฐพร นุตยสกุล และคณะ [6] วิเคราะห์โครงสร้างของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในการรับแรงของสะพานเครื่องหนูนมแบบ MGB (Medium Girder Bridge)

และออกแบบโครงสร้างของสะพานเครื่องหนุมนั้นแบบ MGB เพื่อยุทธวิธีข้ามลำน้ำโดยคำนึงถึงน้ำหนักบรรทุกและการใช้งานด้านกิจการพลเรือนในประเทศไทย จากการวิเคราะห์และตรวจสอบพบว่าสะพานเครื่องหนุมนั้นแบบ MGB นั้น สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าที่ใช้งานทั่วไปในประเทศไทย และเพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะพานเครื่องหนุมนั้นแบบ MGB สามารถถูกออกแบบใหม่โดยลดวัสดุโครงสร้างสะพานลงและออกแบบปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมบนพื้นฐานการผลิตในประเทศไทยได้ในอนาคต

Yong et al. [7] นำเสนอวิธีการเชิงตัวเลขโดยอาศัยองค์ประกอบสปริงและแดมเปอร์แบบกระจายเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบทางพลศาสตร์ที่เกิดจากยานพาหนะหนักเคลื่อนผ่านรอยต่อขยายสะพานแบบโมดูลาร์ และผลกระทบดังกล่าวต่อการตอบสนองของสะพาน ซึ่งคำนึงถึงพื้นที่สัมผัสระหว่างยางกับผิวถนน การตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของทั้งยานพาหนะและสะพานสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ของยานพาหนะและสะพาน ผลของแรงแบบพลศาสตร์ที่รอยต่อขยายต่อปฏิกิริยารองรับและแรงเฉือนมีค่าสูงกว่าผลที่เกิดกับโมเมนต์ดัดของสะพาน อีกทั้งผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขยังแสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากน้ำหนักเพลลาของยานพาหนะและแรงภายในของสะพานอาจมีค่ามากกว่าที่ข้อกำหนดการออกแบบสะพานระบุไว้ และอาจส่งผลต่อความทนทานขององค์ประกอบโครงสร้างบริเวณใกล้เคียงรอยต่อขยายได้

Boheng et al. [8] วิเคราะห์พลศาสตร์โครงสร้างและการหาค่าเหมาะที่สุดของรูปแบบโครงสร้าง เพื่อแก้ไขปัญหาค่าความเสียหายก่อนกำหนดของรอยต่อขยายของสะพานแบบโมดูลาร์ (Modular Bridge Expansion Joints: MBEJ) นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ทฤษฎีความแข็งแรงแบบพัลเซชัน (Pulsation Strength Theory) ในการประเมินความปลอดภัยของ MBEJ ท้ายที่สุดได้ประยุกต์วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของรูปแบบโครงสร้าง (Topology Optimization) เพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงแผ่นรองต่อเชื่อมระหว่างคานกลางและคานขวาง โดยการเพิ่มค่าความแข็ง

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างสะพาน

สะพานเป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมที่ออกแบบให้รองรับน้ำหนักและแรงกระทำต่าง ๆ โดยการออกแบบสะพานเหล็กแบบโมดูลาร์ต้องสามารถรองรับภาระกรรมของยานพาหนะหนักที่มีน้ำหนัก 60 ตันได้ เช่น รถถังแบบ M60 โดยปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาได้แก่

- ภาระจร (Live Load) คือแรงที่เกิดจากยานพาหนะและคนเดินเท้า
- ภาระคงที่ (Dead Load) คือน้ำหนักของตัวเองสะพานเอง รวมถึงองค์ประกอบโครงสร้าง
- แรงกระทำจากลมและแผ่นดินไหว มีผลกระทบต่อความมั่นคงของสะพาน
- พฤติกรรมการโก่งตัว (Deflection) คือการเสียรูปของสะพานภายใต้แรงกระทำ

3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเทคนิคเชิงตัวเลขที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางโครงสร้างที่มีความซับซ้อนโดยแบ่งขอบเขตการวิเคราะห์ระบบออกเป็นองค์ประกอบขนาดเล็กที่เรียกว่า "เอลิเมนต์" และใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการคำนวณพฤติกรรมของวัสดุและโครงสร้าง

เมทริกซ์แข็งเกร็ง (Stiffness Matrix) เป็นเมทริกซ์ที่ใช้คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับการเปลี่ยนรูปของโครงสร้าง เมทริกซ์นี้ถูกพิจารณาในการแก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาผลลัพธ์ของการกระทำภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ซึ่งสมการพื้นฐานของ FEM สามารถเขียนได้เป็น:

$$\{f\} = [K]\{u\} \quad (1)$$

โดยที่:

$[K]$ คือ เมทริกซ์แข็งเกร็ง (Stiffness Matrix)

$\{u\}$ คือ เวกเตอร์การกระจัด (Displacement Vector)

$\{f\}$ คือ เวกเตอร์แรง (Force Vector)

การวิเคราะห์ความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Analysis) โดยการคำนวณการกระจายของแรงภายในโครงสร้าง โดยใช้ความสัมพันธ์พื้นฐาน:

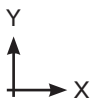
$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (2)$$

โดยที่:

$\{\sigma\}$ คือ เวกเตอร์ความเค้น (Stress Vector)

$[D]$ คือ เมทริกซ์คุณสมบัติของวัสดุ (Material Property Matrix)

$\{\epsilon\}$ คือ เวกเตอร์ความเครียด (Strain Vector)



น้ำหนักทดสอบ 60,095 กก.



รูปที่ 1 การทดสอบภาคสถิติศาสตร์



รูปที่ 2 ติดมาตรวัดความเครียด

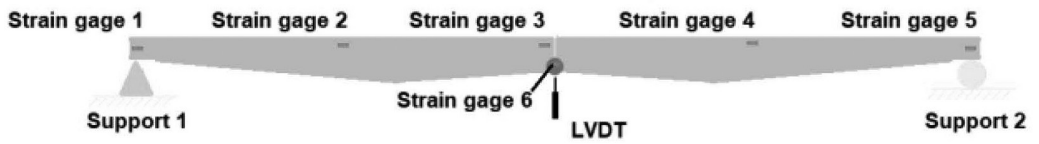


รูปที่ 3 LVDT เซนเซอร์

3.3 การทดสอบ

การดำเนินการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานเพื่อนำมาใช้ทดสอบเพื่อยืนยันความแม่นยำของการคำนวณความแข็งแรงโครงสร้างสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้เครื่องมือวัดได้แก่ มาตรวัดความเครียด (Strain Gauge) เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความเครียดในโครงสร้างสะพาน และ LVDT เซนเซอร์เพื่อวัดระยะโก่งตัวบริเวณกลางสะพาน

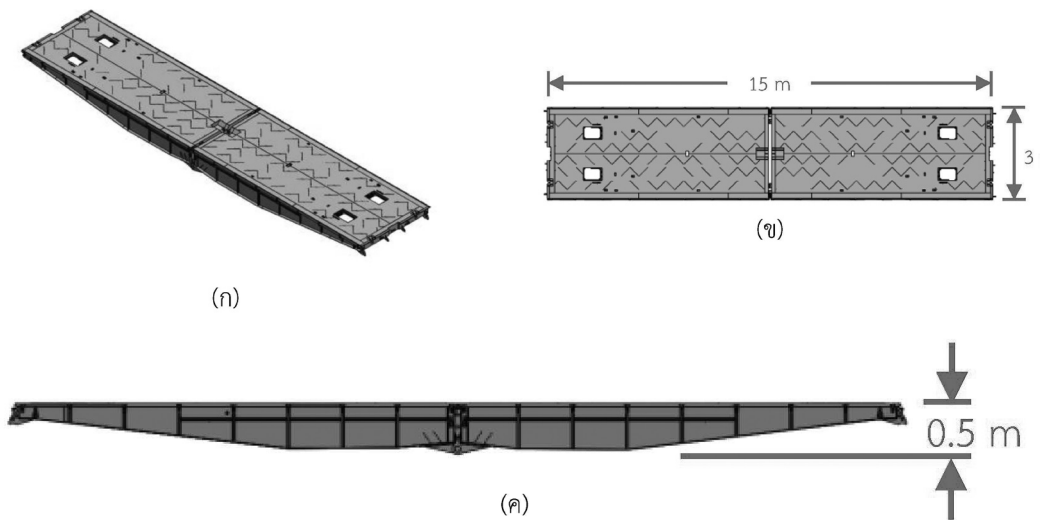
ในการทดสอบจะนำน้ำหนัก 21,561 กก. 19,595 กก. และ 18,939 กก. มาวางบนสะพานตามลำดับ



รูปที่ 4 แสดงจุดติดตั้งมาตรวัดความเครียดและ LVDT เซนเซอร์

4. การวิเคราะห์ความแข็งแรงแบบสถิตยศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.1 แบบจำลอง 3 มิติของสะพาน



รูปที่ 5 แบบ 3 มิติของสะพาน (ก) มุมมองไอโซเมตริก (ข) มุมมองด้านบน (ค) มุมมองด้านหน้า

แบบจำลอง 3 มิติของสะพานมีขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 15 เมตร สูง 0.5 เมตร โดยแบบของสะพานได้จากการวัดขนาดสะพานจริงที่กองพันทหารช่างค่ายบุรฉัตร จ.ราชบุรี

4.2 วัสดุ

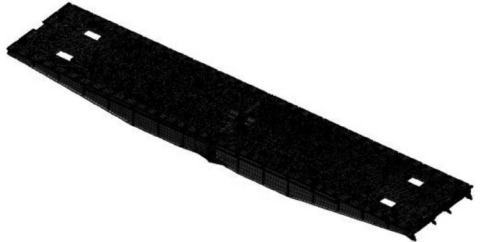
วัสดุที่ใช้ทำสะพานนี้ทำจากเหล็กที่มีความแข็งแรงคราก (Yield strength: σ_y) และความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength: σ_t) ดังตารางที่ 1 ซึ่งเป็นค่าที่ได้รับจากผู้ผลิต

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำสะพาน

วัสดุ	σ_y (MPa)	σ_t (MPa)
วัสดุชนิดที่ 1	1,140	1,250
วัสดุชนิดที่ 2	547	641
วัสดุชนิดที่ 3	411	581

4.3 การแบ่งเอลิเมนต์

รูปที่ 6 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ในแบบจำลอง 3 มิติ



(ก)



(ข)



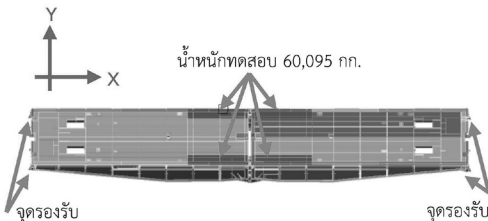
(ค)

รูปที่ 6 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองสะพาน (ก) มุมมอง 3 มิติ (ข) มุมมองด้านหน้า (ค) มุมมองด้านบน

โดยในแบบจำลอง 3 มิติใช้เอลิเมนต์แบบเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 10 โหนด (TET10) จำนวน 429,260 เอลิเมนต์, เอลิเมนต์ทรงหกหน้า 20 โหนด (HEX20) จำนวน 43,272 เอลิเมนต์

4.4 เงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของสะพานแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการจำลองความแข็งแรงใช้จตุรกรับที่ปลายทั้ง 2 ด้าน และให้น้ำหนักทดสอบ 60,095 กก. กระทำบริเวณกลางสะพานดังรูป

5. ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรง

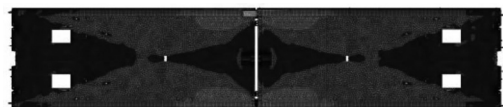
จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบความเค้นสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางสะพานที่สะพานทั้ง 2 ด้านมาประกบกัน โดยความเค้น Von-Mises สูงสุด 602.88 MPa, ความเค้นในแกน X สูงสุด 558.56 MPa, ความเครียดในแกน X สูงสุด $2,721.7 \mu\epsilon$ และระยะโก่งตัวที่กลางสะพาน 82.15 มิลลิเมตร ดังในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8 แสดงความเค้น Von-Mises ที่เกิดขึ้นบนสะพาน (ก) แสดงความเค้นพร้อมการแบ่งเอลิเมนต์ (ข) แสดงความเค้นโดยไม่แสดงเอลิเมนต์ (ค) มุมมองด้านบน



รูปที่ 9 ระยะโค้งตัวสูงสุดของสะพาน

6. ผลการทดสอบภาคสถิติศาสตร์

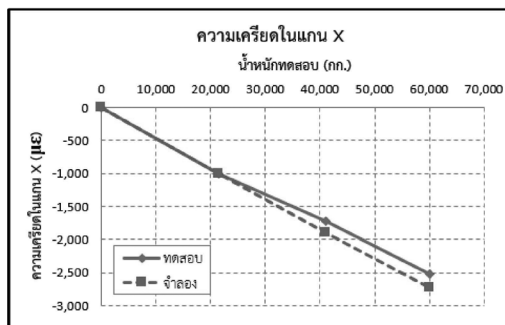
จากการทดสอบสะพานเหล็กโดยการนำน้ำหนัก 21,561 กก., 19,595 กก. และ 18,939 กก. มาวางบนสะพานตามลำดับ แล้วใช้มาตรวัดความเครียด และใช้เซนเซอร์ LVDT วัดการเปลี่ยนแปลงความเครียด และระยะโค้งตัวตามลำดับ พบว่ามาตรวัดความเครียด 3 (Strain gage 3 ของรูปที่ 4) วัดค่าความเครียดได้สูงสุด โดยได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบภาคสถิติศาสตร์

น้ำหนักรวม ที่กระทำต่อ สะพาน (กก.)	ความ เครียด ($\mu\epsilon$)	ความ เค้น (MPa)	ระยะ โค้งตัว (mm)
21,561	-1,003	-193.33	31.7
41,156	-1,719	-338.39	57.1
60,095	-2,526	-538.33	85.2

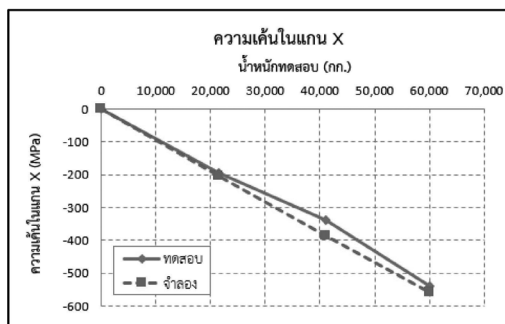
ความเค้นที่แสดงในตารางที่ 2 ได้จากการคำนวณโดยการคูณกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็ก 213 GPa

รูปที่ 10 เปรียบเทียบความเครียดในแกน X ของมาตรวัดความเครียด 3 และผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่บริเวณมาตรวัดความเครียด 3 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด ($\mu\epsilon$) และน้ำหนักรวมที่กระทำต่อสะพาน (กก.)



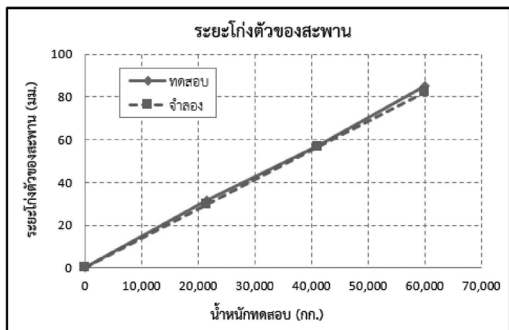
รูปที่ 10 เปรียบเทียบความเครียดในแกน X

รูปที่ 11 เปรียบเทียบความเค้นในแกน X ของมาตรวัดความเครียด 3 และผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่บริเวณมาตรวัดความเครียด 3 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (MPa) และน้ำหนักรวมที่กระทำต่อสะพาน (กก.)



รูปที่ 11 เปรียบเทียบความเค้นในแกน X

รูปที่ 12 เปรียบเทียบระยะโค้งตัวของสะพานระหว่างผลการทดสอบ และผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ตำแหน่งที่มาตรวัดความเครียดอ่านค่าได้สูงสุด โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะโค้งตัวของสะพาน (มม.) และน้ำหนักรวมที่กระทำต่อสะพาน (กก.)



รูปที่ 12 เปรียบเทียบระยะโก่งตัวของสะพาน

จากกราฟเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบพบว่า มีความสอดคล้องกัน ความแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากจุดรองรับที่แตกต่างกัน เนื่องจากการทดสอบไม่สามารถวางจุดรองรับไว้ที่ปลายสะพานได้เช่นเดียวกับการจำลอง ทำให้ระยะห่างของจุดรองรับแตกต่างกัน

7. สรุป

จากการจำลองสะพานด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบภาคสถิติศาสตร์ พบว่า ผลที่ได้จากการจำลอง และผลที่ได้จากการทดสอบ มีความสอดคล้องกัน ความแตกต่างของผลการจำลอง และผลการทดสอบอาจจะเกิดจากระยะของจุดรองรับที่แตกต่างกัน และแบบจำลอง 3 มิติของสะพานและสะพานจริงแตกต่างกันเล็กน้อย

จากผลการจำลอง และผลการทดสอบพบว่า วัสดุชนิดที่ 1 ที่ถูกเลือกในการสร้างโครงสร้างบริเวณกลางสะพานสามารถทนต่อภาระกรรมขนาด 60 ตันได้

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกองพันทหารช่าง ค่ายบุรฉัตร จ.ราชบุรี ที่อนุญาตให้นำรถสะพานเครื่องหนุมนั้มาแสดงการใช้งาน และอนุญาตให้วัดขนาดสะพานได้

ขอขอบคุณ พ.อ. ณัฐพร นุตยะสกุล และคณะ สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์การวัด และการวัดในการทดสอบภาคสถิติศาสตร์

ขอขอบคุณบริษัท โซคนาชัย ออโต้เพรสซึ่ง จำกัด สำหรับการสนับสนุนเจ้าหน้าที่ที่อำนวยความสะดวก

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, "The standard discrete system and origins of the finite element method," in The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, 6th ed. Burlington, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2005, pp. 1–13.
- [2] X. Yang et al., "Structural analysis and optimization of steel truss bridge based on finite element method," in Proc. 3rd Int. Conf. on Frontiers of Mech. Eng. and Chem. Eng. (CONF-FMCE), Aug. 2023, pp. 102–108.
- [3] M. Embaby and M. H. El Naggar, "Experimental and analytical investigation for modular double truss bridge," Eng. Struct., vol. 322, part A, Jan. 2025, Art. no. 119106. doi: 10.1016/j.engstruct.2024.119106.
- [4] W. Intharasuwan et al., "Feasibility study on the development of military bridging for the Royal Thai Army," Chulachomklao Royal Mil. Acad. J., Nakhon Nayok, Thailand, Jul. 2020 (in Thai).
- [5] J. Hornbeck et al., "Trilateral design and test code for military bridging and gap-crossing equipment," Defense Technical Information Center (DTIC), Fort Belvoir, VA, USA, Tech. Rep., Jan. 2005.
- [6] N. Nutayasakul, P. Limjeejong, P. Phothisat, R. Manchusuntharakul, and K. Liaopairoj, "Analysis of MGB bridging system for suitability with current Royal Thai Army (การวิเคราะห์สะพานเครื่องหนุมนั้แบบ MGB เพื่อความเหมาะสมกับกองทัพไทยในปัจจุบัน)," TumCivil, 2021. [Online]. Available: <https://engfanatic.tumcivil.com>. [Accessed: Feb. 11, 2026] (in Thai).

- [7] D. Yong, Z. Wei, H. Lingxia, and T. K. Francis, "Effect of dynamic impact at modular bridge expansion joints on bridge design," *Eng. Struct.*, vol. 127, pp. 645–662, Nov. 2016. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.09.001.
- [8] S. Boheng, D. Yong, and H. Lingxia, "Dynamic strength analysis and structural topology optimization of modular bridge expansion joints under vehicle impactloads," *Structures*, vol. 74, Apr. 2025, Art. no. 108643. doi: 10.1016/j.istruc.2025.108643.

การศึกษาผลของอายุการเก็บรักษาไลน์เนอร์ก่อนการหล่อดินขับ ที่มีต่อการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุทั้งสอง

ไพศาล อภินิพนัน^{1*} และ สุชัย นวลคล้าย²

วันที่รับ 21 สิงหาคม 2568 วันที่แก้ไข 13 มีนาคม 2569 วันตอบรับ 17 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

มอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งเป็นที่นิยมในการใช้งานเป็นยุทธโศปกรณ์ทางการทหารและความมั่นคงของประเทศ วัสดุในมอเตอร์จรวดประกอบด้วยท่อมอเตอร์ ฉนวนกันความร้อน ไลน์เนอร์และแท่งดินขับ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุแต่ละชนิดขึ้นกับกระบวนการผลิต อายุการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม หากการยึดเกาะกันโดยเฉพาะไลน์เนอร์กับดินขับไม่ดี อาจส่งผลให้การทำงานของมอเตอร์จรวดไม่เป็นไปตามที่ออกแบบจนเสียหายได้ ในกระบวนการผลิตมอเตอร์จรวดบางครั้งพบว่าเมื่อบ่มไลน์เนอร์แล้วอาจต้องใช้เวลาหลายสัปดาห์จึงสามารถหล่อดินขับได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอายุการเก็บรักษาไลน์เนอร์ก่อนการหล่อดินขับในมอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งที่มีต่อความสามารถในการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุทั้งสอง มีการพิจารณาสัดส่วนหมู่ฟังก์ชัน (Rt) ที่ต่างกันจากสมบัติของโพลียูรีเทน และศึกษาสมบัติด้านความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะยึดตัวก่อนขาดของชิ้นงานไลน์เนอร์ที่ Rt ระหว่าง 1.10-1.50 จากนั้นจึงทำการทดสอบการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับ ตัวอย่างไลน์เนอร์มีอายุการเก็บรักษาที่เวลา 3, 7, 10 และ 15 วันก่อนหล่อดินขับ และเร่งอายุชุดทดสอบเทียบเท่า 3 ปี ผลการทดลองพบว่าไลน์เนอร์ที่มี Rt ไม่ต่ำกว่า 1.20 ให้สมบัติทางกลที่เหมาะสม และผลการทดสอบค่าการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับอยู่ในช่วง 0.76-1.06 MPa ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ที่ 0.50 MPa แสดงให้เห็นว่าการเก็บรักษาไลน์เนอร์ภายใน 15 วันก่อนหล่อดินขับไม่ส่งผลเสียต่อความสามารถในการยึดเกาะ งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและควบคุมคุณภาพกระบวนการผลิตมอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งให้มีความเชื่อถือได้และปลอดภัยสูงขึ้นได้ต่อไป

คำสำคัญ: มอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็ง, การยึดเกาะ, ไลน์เนอร์, สัดส่วนหมู่ฟังก์ชัน, โพลียูรีเทน

¹ ฝ่ายวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ฝ่ายโรงปฏิบัติการวิจัยและพัฒนา, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: paisan.a@dti.or.th

A Study of the Effect of Liner Aging on Adhesion with Propellant Materials

Paisan Apinhapat^{1*} and Suchuchchai Nuanklai²

Received 21 August 2025 Revised 13 March 2026 Accepted 17 March 2026

Abstract

Solid rocket motors are widely used in military and defense applications due to their simplicity and high reliability. These motors typically consist of a motor case, thermal insulation, liner, and solid propellant grain. The strength of adhesion for each material in the solid rocket motor depends on processing, storage duration, and environmental changes. The quality of adhesion, especially between the liner and the propellant, play a role in ensuring proper motor performance. Poor bonding may lead to structural failure from design and performance. In a production line after curing liner already, there are a long period of times for waiting of propellant casting. The objective of this paper is to investigate the effect of liner aging on adhesion with propellant casting on the interfacial adhesion between the liner and the propellant in composite solid rocket motors.

The research considers various functional group ratios (Rt) in polyurethane formulations, Physical properties including density, Tensile Strength, and Elongation Rate are analyzed. Liner samples with Rt values ranging from 1.10 to 1.50 are produced and tested. Adhesion is evaluated using bonded rectangular specimens. The liner samples are stored for 3, 7, 10, and 15 days before propellant casting. The liner-propellant rectangular in each specimen is accelerated aging equivalent to 3 years of storage life. Experimental results show that liners with Rt at least 1.20 exhibited optimal mechanical properties. The bond strength of liner-propellant ranged from 0.76 to 1.06 MPa, which significantly exceed the design requirement of 0.50 MPa. This result indicates that storing the liner for up to 15 days prior to casting does not degrade adhesion quality. This research supports more flexible production timelines and enhances quality assurance in manufacturing of solid rocket motors.

Keywords: electrical analysis, Vetronics, weapon control system, multiple rocket and missile launcher

¹ Research and Development Department, Defence Technology Institute

² Research and Development Workshop Department, Defence Technology Institute

* Corresponding author: paisan.a@dti.or.th

1. บทนำ

มอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งชนิดดินขับคอมโพสิตเป็นที่นิยมในการผลิตเพื่อใช้งานเป็นยุทธโศปกรณ์ทางด้านการทหารและความมั่นคงของประเทศ โดยทั่วไปหลังจากผลิตเป็นมอเตอร์จรวดแล้ว มักนำไปเก็บรักษาไว้เป็นเวลานาน และอาจมีการขนส่งเพื่อนำไปประกอบรวมหรือเก็บรักษาไว้อีกสถานที่หนึ่ง ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน จำเป็นต้องพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์จรวดอันเนื่องมาจากปัจจัยด้านเวลา การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมอย่างรอบคอบ

ส่วนประกอบภายในหลัก ๆ ของมอเตอร์จรวดประกอบด้วยท่อมอเตอร์ ฉนวน ไลน์เนอร์ (Liner) ดินขับ และส่วนประกอบย่อยอื่น ๆ โดยทั่วไปมอเตอร์ผลิตจากวัสดุโลหะหรือคอมโพสิตซึ่งทำหน้าที่คงรูปร่างของดินขับและรับความดันจากการเผาไหม้ดินขับชั้นถัดไปเป็นฉนวนทำจากวัสดุอย่าง มีหน้าที่ป้องกันความร้อนจากการเผาไหม้ดินขับไม่ให้ไปถึงท่อมอเตอร์จรวด มักติดที่บริเวณด้านหัวและท้ายของท่อมอเตอร์จรวดเพราะเป็นตำแหน่งที่รับภาระกรรมด้านความร้อนค่อนข้างสูง ชั้นถัดเข้ามาจากฉนวนเป็นไลน์เนอร์ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็น โพลียูรีเทน (Polyurethane) ทำหน้าที่ป้องกันความร้อนและช่วยในการยึดเกาะกับท่อมอเตอร์และ/หรือฉนวนในด้านหนึ่ง และช่วยยึดเกาะกับดินขับในอีกด้านหนึ่ง ถัดจากชั้นไลน์เนอร์เป็นแท่งดินขับซึ่งมีส่วนประกอบที่เป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตจากผงโลหะ สารออกซิไดซ์ที่นิยมใช้เป็นแอมโมเนียมเปอร์คลอเรต (Ammonium Perchlorate) และตัวประสานมักเป็นพอลิเมอร์ (Polymer) ชนิดโพรพิลีน ในการศึกษาการยึดเกาะกันของวัสดุแต่ละชนิดภายในมอเตอร์จรวด มีการพิจารณาการยึดเกาะกัน 3 แบบ ได้แก่ การยึดเกาะกันของดินขับและไลน์เนอร์ ไลน์เนอร์และฉนวน ฉนวนและท่อโลหะ

โพลียูรีเทนที่ใช้ในดินขับและไลน์เนอร์เป็นพอลิเมอร์มาจากสารตั้งต้นระหว่าง HTPB และ TDI ขั้นตอนการผสมและการขึ้นรูปเป็นแท่งดินขับส่งผลต่อสมบัติของดินขับ และขั้นตอนดังกล่าวส่งผลต่อสมบัติของไลน์เนอร์เช่นกัน นอกจากนี้ เวลาและ

สภาพแวดล้อมในการเก็บรักษายังส่งผลต่อสมบัติของวัสดุทั้งสองด้วย ด้วยการใช้ตัวประสานชนิดเดียวกัน ทำให้ไลน์เนอร์และดินขับ ยึดเกาะกันได้ดี ช่วยให้โครงสร้างของวัสดุในมอเตอร์จรวดส่วนนี้มีความแข็งแรง ช่วยให้ดินขับสามารถเผาไหม้ตามรูปร่างที่ได้ออกแบบไว้ และยังเป็นอีกประเด็นสำคัญในการพิจารณาประเมินอายุการใช้งานของมอเตอร์จรวดอีกด้วย ในทางตรงกันข้าม การไม่ยึดเกาะกันระหว่างวัสดุอาจเกิดขึ้นได้ มีหลายสาเหตุอันได้แก่ สภาพแวดล้อมในการเก็บรักษาเช่น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป และสภาพการใช้งานของมอเตอร์จรวด ได้แก่ แรงกระทำจากความดันที่เปลี่ยนไปเมื่อดินขับเกิดการเผาไหม้ แรงกระทำจากความเร่งในการเคลื่อนที่เมื่อจรวดถูกยิงออกไป และแรงกระทำจากการกระแทกระหว่างการขนส่ง ดังนั้น ไลน์เนอร์และดินขับต้องมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและแรงกระทำต่าง ๆ วัสดุต้องสามารถรับค่าความเค้นและความเครียดที่สูงกว่าแรงกระทำที่เกิดขึ้น วัสดุนั้นจึงไม่เกิดความเสียหายหรือฉีกขาด

ในกระบวนการผลิตมอเตอร์จรวด หลังจากติดฉนวนเข้ากับท่อมอเตอร์แล้ว ทำการเทเคลือบไลน์เนอร์ และเมื่อบ่มไลน์เนอร์ได้ที่แล้วจึงทำการหล่อดินขับลงในท่อมอเตอร์จรวด อย่างไรก็ตาม กระบวนการอาจมีการติดขัดหรือไม่ต่อเนื่อง เมื่อบ่มไลน์เนอร์เรียบร้อยแล้วอาจต้องใช้เวลาหลายสัปดาห์จึงสามารถหล่อดินขับได้ ด้วยช่วงระยะเวลาที่ต้องรอการหล่อดินขับอาจส่งผลกระทบต่ออายุการยึดเกาะกันระหว่างไลน์เนอร์กับดินขับ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของอายุไลน์เนอร์ก่อนการหล่อดินขับที่มีต่อการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุทั้งสอง โดยพิจารณาการยึดเกาะกันของวัสดุทั้งสองผ่านการเพิ่มอายุมอเตอร์จรวดเป็น 3 ปีร่วมด้วย

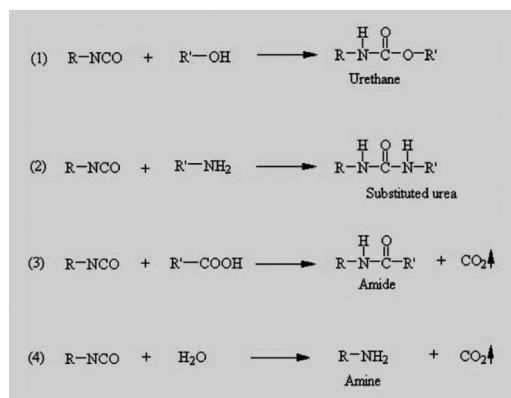
2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ไลน์เนอร์

ไลน์เนอร์ในมอเตอร์จรวดเชื้อเพลิงแข็งมีหน้าที่ยึดเกาะกับผิวท่อมอเตอร์และฉนวนอย่างเหนียวแน่นตามสมบัติของตัวมัน และในอีกด้านหนึ่งก็ยึดเกาะกับ

ดินขับ ทำให้ดินขับและท่อมอเตอร์เป็นเสมือนวัสดุขึ้นเดียวกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดการหดและขยายตัวของดินขับและวัสดุอื่น ๆ วัสดุแต่ละชนิดมีการหดหรือขยายตัวในอัตราที่ไม่เท่ากัน โล้นเนอร์มีการหดและขยายตัวได้มากกว่าดินขับ [1] ด้วยสมบัตินี้ โล้นเนอร์เข้าไปช่วยพยุงการหดหรือขยายตัวของดินขับเพื่อป้องกันไม่ให้ดินขับเกิดการแตกร้าว รวมถึงยังลดแรงอันเกิดจากการกระแทกการสั่นจากภายนอก ซึ่งนำไปสู่การแตกร้าวและการหลุดออกของดินขับในท่อมอเตอร์ได้อีกด้วย

โล้นเนอร์ประกอบสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็น Binder, Curing Agent, Plasticizer, Accelerator, Filler สารเคมีหลักมี 2 ชนิดได้แก่กลุ่มของ Isocyanates ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชัน -NCO และอีกกลุ่มคือ Polyols ซึ่งเป็นสารประกอบของ Polyhydroxy ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชัน -OH ผสมกันตามอัตราส่วนที่เหมาะสม เกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink) เปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็ง เกิดเป็นโพลิเมอร์ชนิดโพลียูรีเทน ที่ทนความร้อนได้สูง และมีสมบัติยึดเกาะกับวัสดุต่าง ๆ ได้อย่างเหนียวแน่น รูปที่ 1 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นโพลิเมอร์ชนิดโพลียูรีเทนและสารข้างเคียง การทำปฏิกิริยาเป็นโพลิเมอร์ชนิดโพลียูรีเทนอาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้หากมีสิ่งเจือปน เช่นเมื่อมีน้ำผสมเกิดเป็นเอมีน (Amine) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นควรทำการไล่ความชื้นก่อนนำมาใช้งาน



รูปที่ 1 กลไกปฏิกิริยาเกิดเป็นโพลิเมอร์ชนิดโพลียูรีเทนและสารข้างเคียง [2]

อีกประการหนึ่ง ส่วนผสมระหว่างโล้นเนอร์กับดินขับมีส่วนประกอบที่คล้ายคลึงกัน เพียงแต่โล้นเนอร์ไม่มีการใส่สารเคมีที่เป็นเชื้อเพลิงและสารออกซิไดซ์ ทำให้สมบัติทางกายภาพของเนื้อโล้นเนอร์ใกล้เคียงกับเนื้อของดินขับ ช่วยทำให้การยึดเกาะกันกับดินขับดียิ่งขึ้น ปริมาณของส่วนผสมต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของสมบัติที่ต้องการ สมบัติหลักของโล้นเนอร์ได้แก่ ความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะยืดตัวก่อนขาด

2.2 การยึดเกาะกันของโล้นเนอร์และดินขับในมอเตอร์จรวด

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติได้แก่กระบวนการในการผลิตฉนวน โล้นเนอร์ ดินขับและการหล่อดินขับ [3]-[5] ฉนวนทำจากยางและวัสดุต่างๆ ที่ต้านทานการติดไฟ ปริมาณน้ำและสมบัติการดูดซึมของสารทำให้แข็งตัวส่งผลต่อสมบัติการยึดเกาะกัน Byrd และ Walters [6] ได้เสนอว่าวัสดุ 2 ชนิดที่เชื่อมติดกันด้วยโล้นเนอร์ พบว่าการยึดเกาะพื้นผิวระหว่างโล้นเนอร์และดินขับ มีความแข็งแรงน้อยกว่าการยึดเกาะพื้นผิวระหว่างโล้นเนอร์-ฉนวน แสดงว่าพื้นผิวโล้นเนอร์และดินขับมีแนวโน้มที่แยกตัวได้ง่ายกว่า ดังนั้นกาวหรือตัวยึดที่เข้ากันได้กับดินขับจึงถูกเลือกเป็นส่วนประกอบของโล้นเนอร์

ในระหว่างการบ่มให้แข็งตัวของโล้นเนอร์ ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันหลักเกิดขึ้นที่หมู่ฟังก์ชัน -NCO และหมู่ฟังก์ชัน -OH ต้องมีปริมาณหมู่ฟังก์ชัน -NCO เพียงพอที่ทำปฏิกิริยาในดินขับหรือในฉนวน เพื่อให้ได้ความแข็งแรงของพันธะที่เพียงพอ ดังนั้นสารที่ทำให้แข็งตัวที่มากเพียงพอจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมี และความสามารถในการยึดเกาะกันที่พื้นผิววัสดุ [7] ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างบ่มโล้นเนอร์ สมบัติทางเคมีของดินขับ และแรงยึดกันระหว่างโมเลกุลกับอนุภาคสารออกซิไดซ์ล้วนมีผลกระทบโดยตรงต่อการยึดเกาะของโล้นเนอร์ หมู่ฟังก์ชัน -NCO ที่เพียงพอช่วยให้เกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชัน -OH รวมถึงความชื้นที่ช่วยปรับสมดุลของหมู่ฟังก์ชัน -NCO ในดินขับด้วยการออกแบบเชิงสมดุลมวลสาร โดยป้องกันการอ่อนตัวของพื้นผิวสัมผัสของดินขับ การเติมสารออกซิไดซ์ลงในสาร

ยึดเกาะของไลน์เนอร์ หรือการเติมสารที่มีหมู่พันธะที่สามารถทำปฏิกิริยาได้ เป็นการช่วยเพิ่มความแข็งแรงของพันธะในไลน์เนอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8] อย่างไรก็ตาม ก่ออาจส่งผลให้ระหว่างการบ่มดินขับทำให้ดินขับอ่อนตัวลงได้ ความสามารถในการยึดเกาะยังได้รับผลกระทบอย่างมีนัยจากกระบวนการไหลของมอเตอร์จรวด และกระบวนการป้องกันความชื้นของมอเตอร์ เพราะสัมพันธ์การขยายตัวเชิงเส้นของท่อมอเตอร์มีค่าต่ำกว่าของโพลีเมอร์ ดังนั้นค่าความแข็งแรงต่อความต้านทานแรงดึงของไลน์เนอร์ควรสูงกว่าของแท่งดินขับ และค่าความยึดตัวของไลน์เนอร์ควรสูงกว่าด้วย Wingborg [9] และ Haska et al. [10] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาพอลิยูรีเทน (PU) อีลาสโตเมอร์ โดยใช้ HTPB-IPDI มีการพิจารณาถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนอัตราส่วนสมมูลระหว่าง [NCO] และ [OH] ในช่วง 0.9 ถึง 1.3 ที่มีต่อสมบัติทางกลของ HTPB-IPDI และ PU ในการวิจัยนี้ ได้มีการทดสอบผลกระทบของการใช้ TDI ซึ่งเป็นสารทำให้แข็งตัวของไลน์เนอร์ ที่ต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะ โดยได้ทำการทดสอบค่าความแข็งแรงของพันธะที่สัดส่วนของ TDI ค่าต่างๆ เริ่มต้นที่ค่าอัตราส่วนสมมูล [NCO]/[OH] เป็น 1.035 โดยพบว่า ค่าความแข็งแรงของการยึดเกาะขึ้นกับสมบัติทางกลของแท่งดินขับและไลน์เนอร์ อย่างไรก็ตาม ค่า S_m และ E_m ของไลน์เนอร์ควรสูงกว่าของแท่งดินขับ ดังนั้น ความแข็งแรงของการยึดเกาะควรขึ้นอยู่กับค่า S_m ของแท่งดินขับ ค่าที่สูงกว่า 8 kg/cm^2 สามารถช่วยป้องกันปัญหาได้

Chih [11] ได้ศึกษาความแข็งแรงของแรงยึดเกาะระหว่างผิวของดินขับและไลน์เนอร์ โดยแรงยึดเกาะที่ผ่านเกณฑ์ต้องมากกว่า 8 kg/cm^2 ได้ศึกษาสัดส่วน TDI ในไลน์เนอร์ซึ่งใช้เป็นสารทำให้แข็งตัวในปริมาณ 0, 2, 5, 10 และ 15% ซึ่งทำให้ค่า NCO/OH มีค่าเป็น 1.035, 1.057, 1.087, 1.144 และ 1.187 ตามลำดับ แรงยึดเกาะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ HTPB ที่ให้ความร้อนกับทำสุญญากาศ และเติม TDI เป็น 10%

2.3 การเพิ่มอายุดินขับ

ดินขับที่เก็บรักษานานเสื่อมสภาพไปเรื่อย ๆ จนไม่สามารถนำไปใช้งานได้ สมบัติทางกล การออกแบบ

รูปร่างดินขับ สภาพแวดล้อมและการใช้งานเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออายุของดินขับที่ยังสามารถใช้งานได้ ดินขับที่เสื่อมสภาพมีสาเหตุจากกระบวนการทางเคมี ได้แก่ สายโซ่ในโพลีเมอร์ถูกออกซิไดซ์ทำให้สายโซ่สั้นลง, สารป้องกันการออกซิไดซ์เสื่อมสภาพ, ตัวประสานถูกออกซิไดซ์ กระบวนการทางกายภาพ เช่นสาร plasticizer เสื่อมสภาพหรือเคลื่อนที่ออกมาที่ผิว, เกิดความชื้น, ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของเหลวเคลื่อนที่ออกมาที่ผิว, เกิดการเปลี่ยนเฟส กระบวนการทางกล ได้แก่ การสั่นสะเทือน, การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ, การเกิดความเค้นมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

สองกระบวนการแรกสัมพันธ์กับเรื่องของปฏิกิริยาและการแพร่ซึ่งเป็นกระบวนการของจลนพลศาสตร์ กระบวนการถูกเร่งจากการเพิ่มอุณหภูมิ การเกิดออกซิเดชันเกิดขึ้นตั้งแต่กระบวนการผลิต ความเสียหายนี้เริ่มจากระดับเล็ก ๆ จนขยายกลายเป็นความเสียหายระดับใหญ่ได้ ดังนั้นการจำลองสภาพดินขับตลอดอายุการใช้งานจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ โดยการเตรียมดินขับที่อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิควบคุมวิธีการโดยทั่วๆ ไปในการทำนายอายุดินขับคือการใช้สมการ Arrhenius โดยสมการมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในรูปของ $\exp(-E_a/RT)$ โดย E_a คือพลังงานกระตุ้น R คือค่าคงที่ของก๊าซ K เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วย K ด้วยวิธีการนี้จึงสามารถทำนายพฤติกรรมของวัสดุโดยใช้เวลาสั้นลงได้ สมมติฐานในการใช้สมการนี้คือกระบวนการทางเคมีเกิดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามสมมติฐานนี้ไม่ได้สมบูรณ์มากนัก และการประมาณการข้อมูลนอกช่วงที่กำหนดไว้ยังแตกต่างกับผลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

ประเด็นของการเร่งอายุดินขับคือเพื่อประเมินสภาพของดินขับเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ได้นำความสัมพันธ์นี้ไปออกแบบเพื่อกำหนดอายุหรือช่วงเวลาการใช้งานของดินขับต่อไป มีนักวิจัยทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเร่งอายุดินขับ [12]-[15] พบว่าการเปลี่ยนแปลงด้านสมบัติทางกลได้แก่แรงดึงและความเครียดถูกอธิบายด้วยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\left(\frac{dP(t,T)}{dt}\right)_T = \frac{S_p(T)}{t} \quad (1)$$

P = สมบัติที่เวลา t (ส่วนใหญ่เป็นสมบัติทางกล)

S_p = พารามิเตอร์การสเกล

T = อุณหภูมิที่เร่งอายุ

ทำการอินทิเกรตสมการที่ (1) ได้

$$P(t,T) = P_0(t_0) + S_p(T)c \log\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (2)$$

P_0 = สมบัติที่เวลา t_0

t_0 = เวลาเริ่มต้น (หลังจากเริ่มบ่มดินขับ)

c = $\ln(10)$

จากสมการที่ (2) มีความเป็นไปได้ต่อผลของพฤติกรรมของวัสดุและทำนายค่าต่าง ๆ ที่อายุดินขับมาก ๆ โดยการสมมติค่า P สามารถสมมติค่า t_0 โดยการเร่งอายุ และหลังจากผ่านไปเป็นเวลา t_n ตามธรรมชาติได้ว่า $P(t_w T_0) = P(t_w T_n)$ และ $P_0(t_0 T_a) = P_0(t_0 T_n)$ สมการก่อนหน้านี้นี้เขียนได้เป็น

$$t_n(T_n) = t_0 \left(\frac{t_a(T_a)}{t_0}\right)^{\frac{S_p(T_a)}{S_p(T_n)}} \quad (3)$$

ความสัมพันธ์นี้เรียกว่าแบบจำลอง Layton [12] ใช้เร่งอายุและทำนายช่วงอายุดินขับได้ ตัวแปร k ในแบบจำลองเป็นตัวแปรไร้หน่วย ในที่นี้ใช้เป็น S

เพื่อที่ทำการเร่งอายุดินขับในรูปของเวลา-อุณหภูมิ ข้อมูลจากสูตรเอ็มไพริคัล [16] สามารถนำมาประยุกต์ใช้การเร่งอายุโดยอ้างอิงจากปฏิกิริยาเคมีได้ตั้งสมการที่ (4)

$$t_E[y] = t_T[d] \times F^{\frac{T_T - T_E}{\Delta T_F}} \times \frac{1}{365.25} \quad (4)$$

t_E = เวลาในหน่วยปีที่อุณหภูมิ T_E (°C)

t_T = เวลาการทดสอบหน่วยวัน ที่อุณหภูมิการทดสอบ T_T

F = แฟกเตอร์อัตราเร่งการเกิดปฏิกิริยาทุก ๆ 10°C

มีค่า 2-5

ΔT_F = อุณหภูมิภายในสำหรับค่าแท้จริง (ใช้ค่า 10°C)

ค่า F เป็นฟังก์ชันกับค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของการเร่งอายุ มีค่าที่ 80-120 kJ/mol และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 20-90°C ค่า F เป็น 3 การมีสารต้านออกซิเดชันและออกซิเจนอยู่ในเนื้อดินขับมีค่าพลังงานกระตุ้นที่ 90-130 kJ/mol คำนี้นี้ใช้ F เป็น 3 [17]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สมบัติโพลียูรีเทนที่ Rt ต่างๆ

ตัวประสานทั้งในไลน์เนอร์และดินขับมีส่วนประกอบที่เป็นโพลีเมอร์ชนิดโพลียูรีเทนซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชัน -NCO ใน TDI และหมู่ฟังก์ชัน -OH ใน HTPB กำหนดให้ Rt คือสัดส่วนระหว่าง -NCO/-OH ปฏิกิริยาที่สมดุลกัน Rt มีค่าเป็น 1.0 ในการทดลองทำการผสม TDI และ HTPB ที่ Rt ต่าง ๆ กัน แล้วนำโพลียูรีเทนที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติทางด้านกายภาพ ทำการทดลองที่ Rt มีค่าเป็น 1.00, 1.05, 1.10, 1.15 และ 1.20 ตามลำดับ

ชิ้นงานถูกเตรียมให้มีความหนาประมาณ 2.0 มม. เพื่อนำไปทดสอบค่าความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะยืดตัวก่อนขาดต่อไป ค่าความแข็งแรงจะส่งผลไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความต้านทานแรงดึง จึงไม่นำมาเสนอในงานวิจัยนี้

3.2 สมบัติของไลน์เนอร์ที่ Rt ต่าง ๆ

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ได้ทำการวิจัยต้นแบบไลน์เนอร์ที่มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในมอเตอร์จรวดโดยได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีของจรวดโครงการจรวดขนาด 300 มม. ระยะยิง 180 กม. ซึ่งมีข้อกำหนดตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมบัติของไลน์เนอร์สำหรับมอเตอร์จรวดโครงการจรวดขนาด 300 มม. ระยะยิง 180 กม.

การทดสอบ	ค่าที่กำหนด
ความหนาแน่น, ASTM D792, at 20°C, g/cm ³	≤1.2
ความต้านทานต่อแรงดึง, ASTM D412, at 20°C, 100mm/min., MPa	≥1.2
% ระยะยืดตัวก่อนขาด, ASTM D412, at 20°C, 100mm/min., %	≥150

กระบวนการผลิตไลน์เนอร์เริ่มจากนำ HTPB ซึ่งผ่านการกวนภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C ผสมสารช่วยเพิ่มความแข็งแรงพลาสติก สารเติมแต่ง ตัวเร่งปฏิกิริยา และขั้นตอนสุดท้ายเติม TDI กวนให้เข้ากันและนำไปเทในแม่พิมพ์ นำตัวอย่างไว้ภายใต้สุญญากาศเพื่อไล่ฟองในเนื้อไลน์เนอร์จนไม่มีฟองเกิดขึ้น ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ไลน์เนอร์เกิดการแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ไลน์เนอร์ที่ได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีมีสูตรที่แน่นอน เมื่อคำนวณย้อนกลับพบว่า R_t มีค่าประมาณ 1.50 จึงได้ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์สมบัติของไลน์เนอร์ในช่วง 1.00-1.50 กำหนดการทดสอบที่ R_t เป็น 1.10, 1.20, 1.30, 1.40 และ 1.50 ตามลำดับ ชิ้นงานถูกเตรียมให้มีความหนาประมาณ 2.0 มม. เพื่อนำไปทดสอบค่าความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะยืดตัวก่อนขาดต่อไป

3.3 การทดสอบการยึดเกาะกันของไลน์เนอร์และดินขับ

ชิ้นงานทดสอบการยึดเกาะเรียกว่าชิ้นงาน Rectangular [11], [18] วัสดุเป็น AISI4130 พื้นที่ในการหล่อไลน์เนอร์เป็น 25x100 มม. ขั้นตอนการเตรียมจนถึงการทดสอบการยึดเกาะไลน์เนอร์และดินขับแสดงในรูปที่ 2 เริ่มจากการนำชิ้นงานปรับผิวให้หยาบด้วยการพ่นขัดผิวโลหะ ใช้เม็ดกรวดเหล็กเกรด SAE GH-40 ขนาดประมาณ 0.7 มม. เครื่องพ่นเม็ดขัดผิวโลหะ รุ่น SD-1002-1-SD ความดันในการพ่นเป็น 8.3-8.5 บาร์ จากนั้นนำไปทำความสะอาดโดยใช้แปรงพลาสติกนุ่ม

อะซิโตนแล้วขัดล้างให้ทั่ว ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 1 ชั่วโมง

เมื่อชิ้นงานแห้งดีแล้วนำไปวัดค่าสนิมโดยใช้ก้านไม้พันสำลีสับคลอโรฟอร์มเช็ดผิวชิ้นงานจุ่มลงในกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง และนำตัวอย่างมาผสมร่วมกับสารละลาย Sulfosalicylic acid และแอมโมเนียเจือจาง สารละลายที่ได้จะมีสีเหลือง จากนั้นนำไปวัดความเข้มข้นของสีด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ยี่ห้อ Agilent รุ่น Cary60 โดยเครื่องจะคำนวณเปรียบเทียบกับกราฟปริมาณสนิมมาตรฐานที่ใส่ข้อมูลไว้ก่อนหน้านี้แสดงผลออกมาเป็นหน่วย mg/L

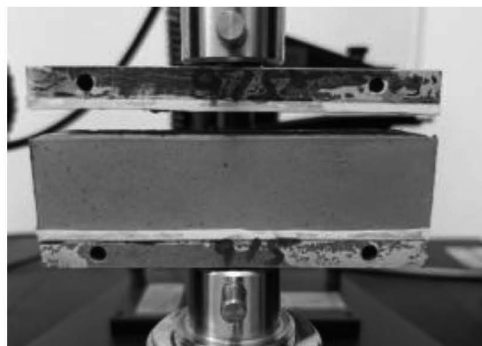
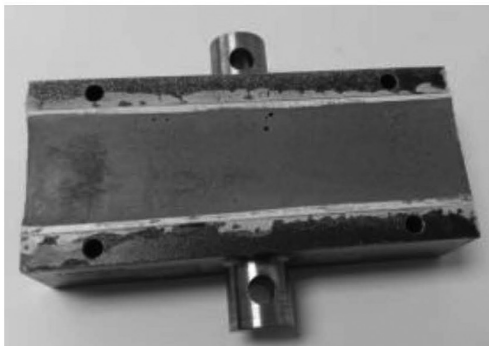
ทำการวัดค่าความหยาบ (Roughness) โดยใช้เครื่องวัด SurfTest รุ่น SJ-210 ทดสอบตามมาตรฐาน JIS-B0601-2001 หลังจากนั้นจึงทา Primer ที่ผิวชิ้นงานเพื่อช่วยการยึดเกาะระหว่างผิวโลหะกับไลน์เนอร์ ขั้นตอนต่อไปทำการเทหล่อไลน์เนอร์หนา 2 มม. บนผิวชิ้นงาน และแบ่งชิ้นงานเป็น 4 ชุด ชุดละ 5 คู่ แต่ละชุดเก็บไว้ในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3, 7, 10 และ 15 วัน ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำมาประกอบเป็นชุด Rectangular ทำการผสมดินขับสูตร A4 และหล่อดินขับลงในชุด Rectangular ดินขับมีความหนา 20 มม. ทำการบ่มให้ดินขับแข็งตัวประมาณ 5 วันนำไปอบแรงอายุดินขับที่ 70°C ให้มีอายุ 3 ปี เมื่อคำนวณจากสมการ (4) ใช้เวลาในการอบแรงอายุดินขับที่ 7.8 วัน จากนั้นจึงนำมาตัดแต่งและนำไปทดสอบการยึดเกาะต่อไป



รูปที่ 2 ขั้นตอนในการเตรียมจนถึงการทดสอบการยึดเกาะไลน์เนอร์และดินขับ

ลักษณะของชุด Rectangular ที่นำไปทดสอบการยึดเกาะทั้งก่อนและหลังการทดสอบเป็นดังรูปที่ 3 เครื่องทดสอบแรงดึง Introl รุ่น 5965 ถูกใช้

ในการทดสอบการยึดเกาะของชิ้นงานตัวอย่าง Rectangular



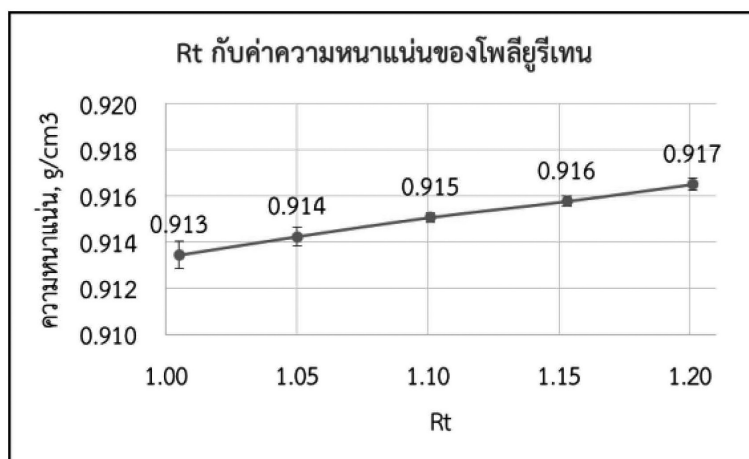
รูปที่ 3 ชุดทดสอบ Rectangular สำหรับทดสอบการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับก่อนและหลังการทดสอบการดึง

4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 สมบัติโพลียูรีเทนที่ Rt ต่าง ๆ

ในการทดลองช่วงเริ่มต้น มีการผสมโพลียูรีเทนที่ Rt น้อยกว่า 1.0 พบว่าชิ้นงานที่ได้ไม่แข็งตัวเพียงพอจึงไม่นำมาทดสอบต่อ ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะยึดตัวก่อนขาดของโพลียูรีเทนที่ Rt เป็น 1.00-1.20 แสดงในรูป

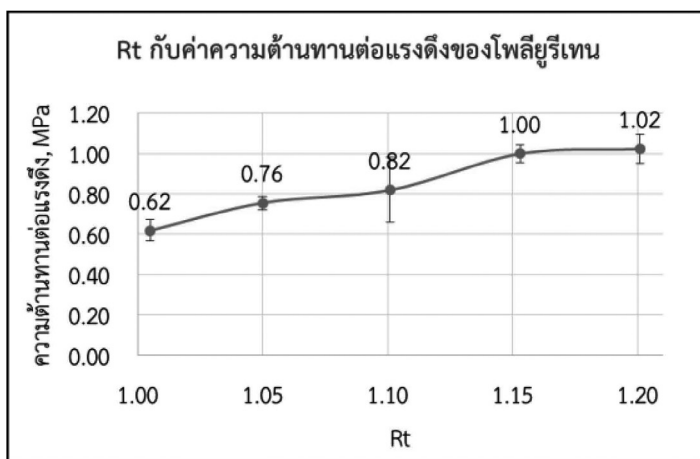
ที่ 4-6 ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นที่ได้อยู่ในช่วง 0.913-0.917 g/cm³ เมื่อ Rt สูงขึ้นค่าความหนาแน่นก็สูงขึ้นตาม ทั้งนี้ค่าความหนาแน่นของ HTPB เป็น 0.901 g/cm³ ส่วนค่าความหนาแน่นของ TDI เป็น 1.21 g/cm³ ดังนั้นเมื่อ Rt สูงขึ้น หมายถึงว่ามีปริมาณ TDI สูงขึ้นจึงทำให้ความหนาแน่นของโพลียูรีเทนมีค่าสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4 ค่าความหนาแน่นของโพลียูรีเทนที่ Rt ต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึง พบว่า ได้ค่าเป็น 0.62, 0.76, 0.82, 1.00 และ 1.02 MPa ตามลำดับ หรือคิดเป็น 61, 75, 80, 98 และ 100% เมื่อเทียบกับ Rt 1.20 เห็นได้ว่าเมื่อ Rt สูงขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้นตาม และเห็นได้ว่า ที่ Rt 1.15 และ 1.20 ผลที่ได้เป็น 1.00 และ 1.02 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่างกันเพียง 2% ในขณะที่ผลของ Rt อื่นๆ มีความแตกต่างกันมากกว่า ในการวิเคราะห์ เป็นไปได้ว่าที่ Rt ที่ 1.00 ปริมาณ -NCO ส่วนหนึ่ง

เกิดปฏิกิริยาเป็นสารข้างเคียงจึงทำให้ได้โพลียูรีเทน ไม่เต็มที่ ส่งผลให้ ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ แต่เมื่อ Rt สูงขึ้น ปริมาณ -NCO มีมากขึ้นทำให้ได้โพลียูรีเทน มากขึ้นด้วย ส่งผลให้ ความต้านทานต่อแรงดึงสูงขึ้น จนถึง Rt ที่ประมาณ 1.15 -NCO จะเริ่มมีปริมาณมาก เกินพอ ประกอบกับสัดส่วนของ TDI ในสูตรมีปริมาณ เล็กน้อยจึงทำให้แม้ Rt สูงขึ้นไปอีกก็ทำให้ความต้านทาน ต่อแรงดึงมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

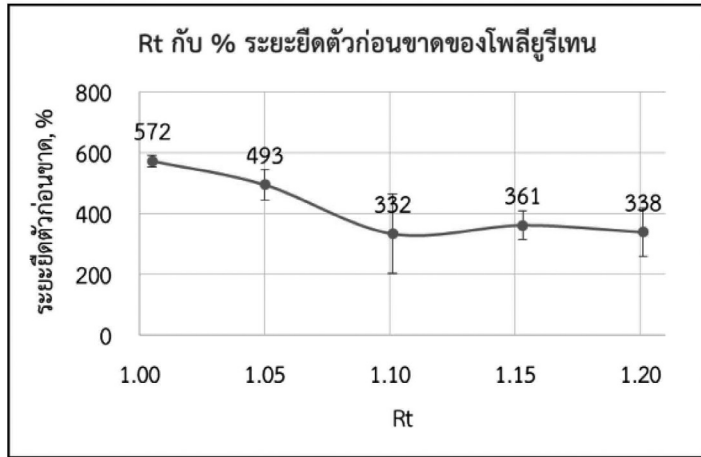


รูปที่ 5 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของโพลียูรีเทนที่ Rt ต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาค่า % ระยะเวลาตัวก่อนขาด โดยหลักการค่า % ระยะเวลาตัวก่อนขาดแปรผกผันกับค่า ความต้านทานต่อแรงดึง พบว่าผลที่ได้มีค่าเป็น 572, 493, 332, 361 และ 338% ตามลำดับ หรือคิดเป็น 169, 146, 98, 107 และ 100% เมื่อเทียบกับ Rt 1.20 เห็นได้ว่า เมื่อ Rt สูงขึ้น % ระยะเวลาตัวก่อนขาดมีค่าต่ำลงซึ่ง สอดคล้องกับหลักการ และที่ Rt 1.10-1.20 ค่า % ระยะเวลาตัวก่อนขาดมีความแตกต่างเพียง 2% และ 7% เท่านั้นเมื่อเทียบกับค่าอื่นๆ ในการวิเคราะห์เช่นเดียวกับ ค่าความต้านทานต่อแรงดึง เมื่อ Rt เป็น 1.00 -NCO ใน DTI ส่วนหนึ่งเกิดปฏิกิริยาเป็นสารข้างเคียงที่ไม่ใช่ โพลียูรีเทน ทำให้มี -OH ใน HTPB มีมากเกินไป

% ระยะเวลาตัวก่อนขาดจึงยังมีค่าสูง แต่เมื่อ Rt สูงขึ้น จนถึง 1.10 -NCO ใน DTI จะมีปริมาณพอดีกับ -OH ใน HTPB จึงทำให้ได้โพลียูรีเทนมากที่สุด เป็นผลให้ค่า % ระยะเวลาตัวก่อนขาดจึงเริ่มต่ำลง ประกอบกับสัดส่วน ของ TDI ในสูตรมีปริมาณเล็กน้อยจึงทำให้แม้ Rt สูงขึ้น ไปอีก ก็ทำให้ค่า % ระยะเวลาตัวก่อนขาดมีค่าเปลี่ยนแปลง เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

จากการวิเคราะห์ให้เห็นได้ว่า Rt ช่วงที่ควรนำไป พิจารณาต่อควรมีค่าที่มากกว่า 1.10 ขึ้นไป เพื่อให้ได้ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่มีค่าสูงและ % ระยะเวลาตัว ก่อนขาดที่ไม่ต่ำเกินไป

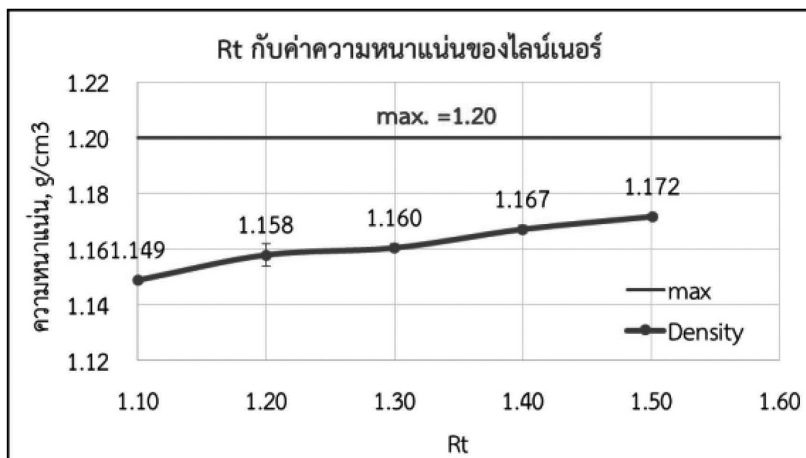


รูปที่ 6 ค่า % ระยะยัดตัวก่อนขาดของโพลียูรีเทนที่ Rt ต่าง ๆ

4.2 สมบัติของไลน์เนอร์ที่ Rt ต่างๆ

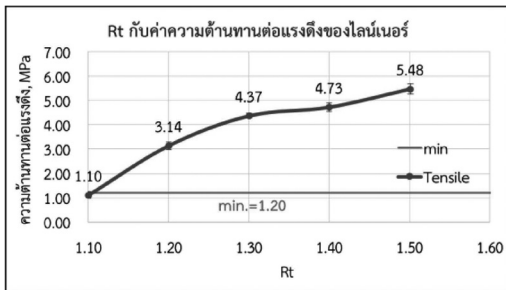
ในการทดลองได้เลือกผลการทดสอบค่าความหนาแน่น ความต้านทานต่อแรงดึง และ % ระยะยัดตัวก่อนขาดของไลน์เนอร์ตามสูตรที่ได้รับการถ่ายทอดจากมิตรประเทศโดยเลือก Rt เป็น 1.10-1.50 ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 7-9 ตามลำดับ เนื่องจากไลน์เนอร์มีส่วนผสมอื่นๆ

เข้ามา ฉะนั้นผลการทดสอบที่ได้จึงมีความแตกต่างกับผลการทดสอบของโพลียูรีเทน แต่ควรมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นพบว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วง 1.149-1.172 g/cm³ โดยมีค่าในการออกแบบไม่เกิน 1.20 g/cm³ แสดงให้เห็นว่า Rt ตลอดช่วงการทดสอบผ่านเกณฑ์ค่าที่ออกแบบไว้



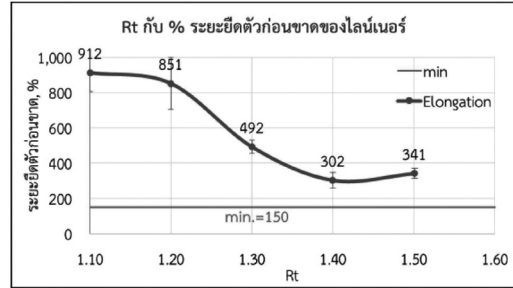
รูปที่ 7 ค่าความหนาแน่นของไลน์เนอร์ที่ Rt ต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึง พบว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วง 1.10-5.48 MPa โดยมีค่าในการออกแบบไม่ต่ำกว่า 1.2 MPa มีเพียงไลน์เนอร์ที่ Rt 1.10 ที่มีค่า ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่าค่าที่ออกแบบเพียงตัวอย่างเดียว นอกจากนี้จากแนวโน้มที่เกิดขึ้น หาก Rt สูงขึ้นกว่านี้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงก็สูงขึ้นตามไปด้วยแต่ต้องพิจารณาถึงค่าความหนาแน่นและค่า % ระยะยืดตัวก่อนขาดที่ต้องไม่ให้เกิดค่าที่ออกแบบไว้ด้วย



รูปที่ 8 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของไลน์เนอร์ที่ Rt ต่าง ๆ

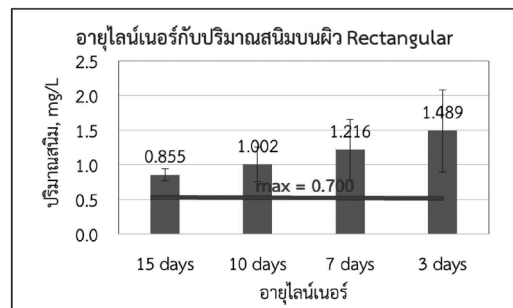
เมื่อพิจารณาค่า % ระยะยืดตัวก่อนขาด พบว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วง 302-912% โดยมีค่าในการออกแบบไม่ต่ำกว่า 120% แสดงให้เห็นว่า Rt ตลอดช่วงการทดสอบผ่านเกณฑ์ค่าที่ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตาม จากกราฟเห็นได้ว่า ช่วง Rt เป็น 1.4 และ 1.5 ค่า % ระยะยืดตัวก่อนขาด มีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าในช่วงของ Rt 1.10-1.30 หากเพิ่ม Rt แล้วค่า % ระยะยืดตัวก่อนขาดยังไม่ต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้ ควรจะทำให้ได้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้นกว่าเดิมอีกเล็กน้อย แต่ต้องพิจารณาร่วมกับค่าความหนาแน่นที่สูงขึ้นและไม่ให้เกิดค่าที่ออกแบบไว้ด้วย



รูปที่ 9 ค่า % ระยะยืดตัวก่อนขาดของไลน์เนอร์ที่ Rt ต่าง ๆ

4.3 การทดสอบการยึดเกาะกันของไลน์เนอร์และดินขับ

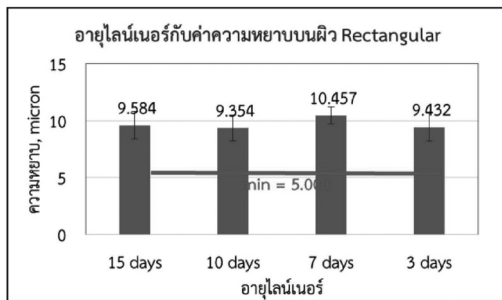
ชิ้นงาน Rectangular ก่อนนำไปติดไลน์เนอร์ผ่านการพ่นขัดผิวโลหะและทำความสะอาดเพื่อปรับผิวให้มีความขรุขระเพิ่มการยึดเกาะกับไลน์เนอร์ มีการวัดค่าสนิมและความหยাবบนผิวชิ้นงาน Rectangular ค่าสนิมในการออกแบบกำหนดเกณฑ์ไว้ที่ไม่เกิน 0.700 mg/L ผลที่วัดได้เป็นดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ค่าปริมาณสนิมบนชิ้นงาน Rectangular

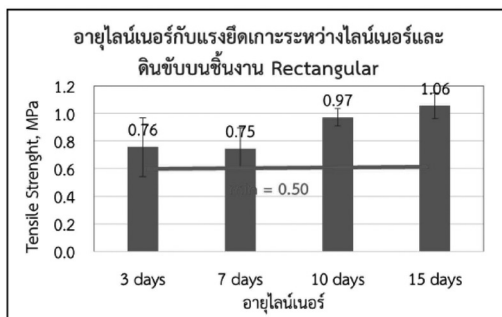
พบว่าค่าสนิมอยู่ในช่วง 0.855-1.489 mg/L เกินกว่าค่าที่ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตามผลในครั้งนี้นับว่าทุกชิ้นขาดที่รอยต่อระหว่างไลน์เนอร์และดินขับ แสดงว่าค่าสนิมที่สูงกว่าเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ยังส่งผลให้การยึดเกาะกันระหว่างผิวโลหะและไลน์เนอร์ดีกว่าการยึดเกาะกันระหว่างไลน์เนอร์และดินขับ นอกจากนี้การที่มี primer ทาระหว่างชิ้นงาน Rectangular กับไลน์เนอร์ยังเป็นอีกส่วนที่ช่วยให้การยึดติดกันมีประสิทธิภาพดีขึ้นจนทำให้ปริมาณสนิมที่เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไม่ใช่ปัจจัยหลัก

เมื่อพิจารณาค่าความหยาบของผิว ผลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 11 พบว่าค่าที่ได้อยู่ในช่วง 9.354-10.457 ไมครอน ค่าทั้งหมดสูงกว่าค่าขั้นต่ำในการออกแบบที่ไม่น้อยกว่า 5.000 ไมครอน เป็นผลทำให้มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะกันระหว่างผิวโลหะและไลน์เนอร์สูงขึ้น ประกอบกับการช่วยให้มี primer เกาะอยู่บนพื้นผิวโลหะได้มากขึ้น เป็นการช่วยให้การยึดเกาะระหว่างวัสดุทั้งสองดีขึ้น จึงมั่นใจได้ว่าการยึดเกาะกันระหว่างผิวโลหะและไลน์เนอร์มีประสิทธิภาพดี



รูปที่ 11 ค่าความหยาบของผิวชิ้นงาน Rectangular

ผลการทดสอบการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับโดยวิเคราะห์จากค่าความต้านทานต่อแรงดึงของชุด Rectangular เปรียบเทียบอายุของไลน์เนอร์ก่อนหล่อดินขับในช่วง 3-15 วัน และดินขับถูกอบแรงอายุให้มีอายุ 3 ปี โดยมีเกณฑ์ของค่าที่ออกแบบไว้ต้องไม่น้อยกว่า 0.50 MPa แสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ค่าแรงยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับเทียบกับอายุไลน์เนอร์ก่อนหล่อดินขับ

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.756-1.06 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้หากเป็นชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบแรงอายุมาก่อน ค่าการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับควรมีค่าสูงกว่านี้อีกเล็กน้อย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอายุของไลน์เนอร์ช่วง 3 - 15 วันก่อนหล่อดินขับยังให้ประสิทธิภาพในการยึดเกาะกับดินขับได้สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ฉะนั้นหากในกระบวนการผลิตมีความจำเป็นต้องทิ้งช่วงการผสมและหล่อดินขับภายใน 15 วันก็ยังสามารถใช้ท่อโมเตอร์ที่ติดไลน์เนอร์ไว้แล้วทำการหล่อดินขับต่อไปได้

5. สรุปผลการวิจัย

5.1 โพลียูรีเทน ที่ให้สมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมควรมี Rt ไม่น้อยกว่า 1.10

5.2 ไลน์เนอร์ที่ให้สมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมควรมี Rt ไม่ควรมีน้อยกว่า 1.20

5.3 การหล่อไลน์เนอร์ทิ้งไว้ก่อนหล่อดินขับในช่วง 3-15 วันยังคงให้ค่าการยึดเกาะระหว่างไลน์เนอร์และดินขับที่มีความแข็งแรงเพียงพอเมื่อเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ที่ไม่น้อยกว่า 0.5 MPa

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 จากการทดลองพบว่าไลน์เนอร์ที่มีสมบัติตามเกณฑ์มี Rt 1.20-1.50 หากทำการทดลองเพิ่มเติมอาจมีสมบัติตามเกณฑ์ที่ Rt สูงกว่า 1.50 ได้อีกเล็กน้อย

6.2 การเตรียมชิ้นงาน Rectangular พบว่าค่าสั่นเกินกว่าเกณฑ์ที่ออกแบบไว้ทั้งหมด จึงเป็นประเด็นที่น่าจะศึกษาหาวิธีการปรับปรุงชิ้นงานให้มีค่าสั่นที่ลดลงต่อไป

6.3 ในการทดลอง ชิ้นงานถูกเก็บไว้ในโถดูดความชื้น แต่กระบวนการผลิตติดไลน์เนอร์ในท่ออาจมีสภาพที่ต่างออกไป ซึ่งความชื้นมีผลต่อปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของไลน์เนอร์และดินขับมาก อาจต้องจำลองสภาวะให้เหมือนกับการผลิตจริงให้มากขึ้น นำมาซึ่งผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับสภาวะจริงมากที่สุด

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนด้านบุคลากร วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จากฝ่ายวิจัยและพัฒนา และฝ่ายโรงปฏิบัติการวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ กระทรวงกลาโหม

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. P. Sutton and O. Biblarz, "Liners, Insulators, and Inhibitors," in *Rocket Propulsion Elements*, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010, pp. 526-529.
- [2] "Polyurethane chemistry," Available: <https://sunilbhangale.tripod.com/pu.html>. [Accessed: Jul. 21, 2025].
- [3] A. M. Pang and J. Zheng, "Prospect of the Research and Development of High Energy Solid Propellant Technology," *Journal of Solid Rocket Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 289-293, 2004.
- [4] Z. Wirpsza, *Polyurethanes: Chemistry, Technology and Applications*. New York, NY, USA: E. Horwood, 1993, pp. 354-355.
- [5] G. Oertel, *Polyurethane Handbook*, 2nd ed. Munich, Germany: Hanser Publishers, 1994, pp. 136-137.
- [6] J. D. Byrd and P. B. Walters, "Case Bonding Considerations for Large Rocket Motors," in *Proc. AIAA Paper*, 1976, p. 638.
- [7] Z. P. Huang, H. Y. Nie, Y. Y. Zhang, L. M. Tan, H. L. Yin, and X. G. Ma, "Migration Kinetics and Mechanisms of Plasticizers and Stabilizers at Interfaces of NEPE Propellant/HTPB Liner/EPDM Insulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 251-252, pp. 251-257, 2012, doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.05.103.
- [8] J. A. Condon and J. R. Osborn, "Effect of Oxidizer Particle Size Distribution on the Steady and Nonsteady Combustion of Composite Propellants," *School of Mechanical Engineering, Purdue Univ., Lafayette, IN, USA, AFRPL-TR-78-17*, 1978.
- [9] N. Wingborg, "Increasing the Tensile Strength of HTPB with Different Isocyanates and Chain Extenders," *Polymer Testing*, vol. 21, no. 3, pp. 283-287, 2002, doi: 10.1016/S0142-9418(01)00083-6.
- [10] S. B. Haska, E. Bayramli, F. Pekel, and S. Ozkar, "Mechanical Properties of HTPB-IPDI-Based Elastomers," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 64, no. 12, pp. 2347-2354, 1997, doi: 10.1002/(SICI)1097-4628(19970620)64:12<2347::AID-APP9>3.0.CO;2-L.
- [11] C. Y. Liao and S. Lee, "Improving Bond Strength at Propellant-Liner Interfaces," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 31, no. 5, pp. 1452-1457, Sep. 2015.
- [12] L. H. Layton, *Chemical Structural Aging Studies on an HTPB Propellant*, AFRPL-TR-75-13, 1975.
- [13] F. Lillo, B. D'Andrea, G. Marcelli, and A. Sebastia, "Long-Term Aging of Aerospace and Tactical SRM: Experimental Study," in *Proc. 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. Exhibit*, Salt Lake City, UT, USA, Jul. 8-11, 2001.
- [14] E. Sbriccoli, R. Salterelli, and S. Martinucci, "Comparison Between Accelerated and Natural Aging," in *Proc. 20th Int. Annu. Conf. ICT and 18th Tech. Meeting GUS*, Karlsruhe, Germany, Jun. 27-30, 1989.

- [15] M. Kivity, G. Hartman, and A. M. Achlama, "Aging of HTPB Propellant," in Proc. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. Exhibit, Tucson, AZ, USA, Jul. 10-13, 2005.
- [16] M. A. Bohn, "Prediction of Equivalent Time-Temperature Loads for Accelerated Ageing to Simulate Preset In-Storage Ageing and Time-Temperature Profile Loads," in Proc. 40th Int. Annu. Conf. ICT, Karlsruhe, Germany, Jun. 23-26, 2009, pp. 78.1-78.28.
- [17] S. Cerri, M. A. Bohn, K. Menke, and L. Galfetti, "Ageing Behaviour of HTPB-Based Rocket Propellant Formulations," Central European Journal of Energetic Materials, vol. 6, no. 2, pp. 149-165, 2009.
- [18] Q. Zhou, J. Xu, X. Chen, J. Zheng, and C. Zhou, "Stress Singularity in a Rectangular Bond Specimen of a Solid Rocket Motor: Effects and Elimination," International Journal of Adhesion and Adhesives, vol. 63, pp. 57-65, Dec. 2015.

การเปรียบเทียบชิปนวิธีภายในอาวุธปืนขนาด 5.56 มม. ที่ใช้ดินปืน แบบทรงกระบอกและทรงกลม

สุรสิทธิ์ ปาลสาร^{1*}

วันที่รับ 2 กันยายน 2568 วันที่แก้ไข 30 มกราคม 2569 วันตอบรับ 17 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

อาวุธปืนขนาดลำกล้อง 5.56 มม. เป็นที่นิยมใช้ในเหล่าทหารราบและหน่วยงานตำรวจตระเวนชายแดน อาวุธปืนที่ใช้งานส่วนใหญ่ทำงานด้วยระบบก๊าซ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ดินปืนในตัวเอง การวิเคราะห์ความดันที่เกิดขึ้นในรังเพลิงและความเร็วต้นของกระสุนมีความสำคัญต่อการออกแบบและการใช้งาน ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างดินปืนสองแบบ ได้แก่ ดินปืนแบบทรงกระบอกและดินปืนแบบทรงกลม และกระสุนสองชนิดคือ M193 และกระสุน M855 ผลการเปรียบเทียบชิปนวิธีภายในของดินปืนทั้งสองแบบพบว่า สำหรับกระสุนแต่ละชนิด ดินปืนแบบทรงกระบอกมีความดันรังเพลิงที่สูงกว่าและเวลาเผาไหม้สั้นกว่าแบบทรงกลม ความเร็วต้นของดินปืนแบบทรงกระบอกสูงกว่าแบบทรงกลม และประสิทธิภาพเชิงชิปนวิธีแบบทรงกระบอกมากกว่าแบบทรงกลม การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระสุน M193 และ M855 พบว่าประสิทธิภาพกระสุนของ M855 มากกว่า M193 เช่นเดียวกันในดินปืนทั้งสองแบบ

คำสำคัญ: ชิปนวิธีภายในอาวุธปืน, ดินปืน, ดินปืนทรงกระบอก, ดินปืนทรงกลม

¹ ส่วนงานวิศวกรรมระบบขับเคลื่อน, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: surasith.p@dti.or.th

Comparison of Interior Ballistic in 5.56 mm Rifle Using Single Perforated Grain and Spherical Grain Gunpowder

Surasith Palasarn^{1*}

Received 2 September 2025 Revised 30 January 2026 Accepted 17 March 2026

Abstract

The 5.56-mm firearm is commonly used by infantry and border police units. Most firearms in service are gas-operated, which results from the internal combustion of gunpowder. Analysis of breech pressure and muzzle velocity is important for design and operation. This research comparatively examined two types of gunpowder single-perforated grains and spherical grains and two types of cartridges, M193 and M855. The interior-ballistic comparison showed that, for each cartridge type, single-perforated grains produced higher breech pressures and shorter burn times than spherical grains. The muzzle velocity and ballistic efficiency of single-perforated grains were also higher than those of spherical grains. A comparison between the M193 and M855 cartridges indicated that M855 exhibited better ballistic efficiency than M193 for both gunpowder types.

Keywords: Interior ballistic of gun, Gunpropellant, Single perforated grain, Spherical grain

¹ Propulsion Systems Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author: surasith.p@dti.or.th

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้งานปืนประจำกาย ภายในหน่วยทหารและตำรวจ โดยมีปืนที่ประจำการอยู่ในกองทัพบกของไทย ได้แก่ ปืนเล็กยาวแบบ M16A1 A2 และ A4 ของสหรัฐอเมริกา ปืนเล็กยาวแบบ TAR-21 ของอิสราเอล ปืนเล็กยาว M4A1 ใช้ในหน่วยรบพิเศษ เป็นต้น ปืนเล็กยาวที่ประจำการอยู่ส่วนใหญ่ ใช้กระสุนขนาดเดียวกัน นั่นคือ กระสุนขนาด 5.56x45 มม. ตามมาตรฐานประเทศในกลุ่ม NATO การใช้งานปืนขนาด 5.56x45 มม. มีอยู่มากในกองทัพบกไทย และมีการอัปเดตระบบอาวุธและกระสุนให้ทันสมัยอยู่ตลอดเวลา ในส่วนของกระสุนปืนขนาด 5.56x45 มม. มีการใช้งานหลากหลายแบบ เช่นเดียวกัน เช่น กระสุน M855, M193 และกระสุนส่องวิถี (tracer) M856 เป็นต้น

การคำนวณชิปนวิธิภายในอาวุธปืน โดยหลักการแล้วอาศัยหลักการคำนวณการเผาไหม้บนพื้นที่ผิวเปิดของดินปืนพร้อม ๆ กัน ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นและนำเสนอโดย Corner [1] หลักการดังกล่าวเป็นรูปแบบที่คำนวณได้ง่ายและมีความแม่นยำ ต่อมามีการคำนวณที่อาศัยหลักการทางฟิสิกส์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิง สามารถแสดงกราฟความดันและความเร็วของกระสุนของปืน Vasile [2] การคำนวณสมการการเคลื่อนที่ของกระสุนปืน โดยสมการลากรองจ์ได้รับการพัฒนาแสดงโดย Carlucci และคณะ [3] การใช้หลักการของ Vallier-Heydenreich การคำนวณทางทฤษฎีและผลการทดสอบของปืนขนาด 7.62 มม. แสดงค่าความดันและความเร็วของกระสุนปืนของ Cronemberger และคณะ [4] นอกจากนี้การคำนวณสมการชิปนวิธิภายในของดินปืนแบบทรงกลมและแบบทรงกระบอก ได้รับการพัฒนาขึ้นจากสมการเชิงอนุพันธ์ นำเสนอโดย Akcay และคณะ [5]

การจำลองชิปนวิธิภายในโดยใช้คอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์สมรรถนะของอาวุธปืน ซึ่งสามารถเพิ่มความแม่นยำและลดต้นทุนการทดลองจริงได้ [6], [8] ข้อมูลทางเทคนิคของกระสุนปืนและคุณลักษณะของอาวุธตามมาตรฐานทางทหารถูกนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลสำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบ [10], [11]

การพัฒนาารูปแบบของกระสุนมีความต้องการกระสุนที่มีความเร็วสูง และมีประสิทธิภาพสูงกว่า ในขณะที่ตัวปืนมีน้ำหนักที่เบาลง เพื่อให้ได้คุณสมบัติดังกล่าวนี้ การปรับปรุงรูปแบบของดินปืน มีผลต่อชิปนวิธิภายในลำกล้องปืน และทำให้กระสุนมีความเร็วสูงขึ้น การคำนวณชิปนวิธิภายในที่เกิดขึ้นจากการปรับปรุงลักษณะของดินปืนมีส่วนช่วยในการออกแบบได้ดีขึ้น โดยปกติแล้ว กระสุนปืนเล็กยาวมีดินปืนอยู่สองลักษณะ ได้แก่ ดินปืนแบบทรงกระบอก (single perforated grain) และดินปืนแบบทรงกลม (spherical grain) การเปรียบเทียบชิปนวิธิภายในเป็นการคำนวณความดันรังเพลิง และความเร็วของกระสุน ที่เกิดจากดินปืนทั้งสองแบบ เป็นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ รวมถึงการเปรียบเทียบกระสุนสองชนิด ได้แก่ M855 และ M193 ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน [10], [12]

2. สมการชิปนวิธิภายใน

เมื่อพิจารณาการเผาไหม้ของดินปืนแบบทรงกระบอก ความหนาของรูปทรงตรงจุดที่น้อยที่สุด เรียกว่าความหนาเว็บ (web thickness) แทนด้วย D มีค่าตามสมการ

$$D = \frac{1}{2}(d_1 - d_2) \quad (1)$$

โดยที่ d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก
 d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ดินปืนหนัก C ในช่วงเวลา t มีค่าเท่ากับ $c\phi(t)$ โดยที่ f คือ สัดส่วนเชื้อเพลิงคงเหลือ ดังนั้น สำหรับดินปืนรูปร่างทั่วไป $= \phi$ 1 เมื่อ $f = 0$ ความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ และ f เป็นไปตามสมการ

$$\phi = (1 - f)(1 + \theta f) \quad (2)$$

โดยที่ θ คือ ฟังก์ชันฟังกซ์ (form function)

ในกรณีของดินปืนทรงกระบอก (single perforated grain) ค่า $\theta = 0$ Corner [1] สำหรับกรณี ดินปืนทรงกลม (spherical grain) ความหนาเว็บ D มีค่าเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของดินปืน ค่า $\theta = 1.4$ Carlucci และคณะ [3] และสมการสัดส่วนก๊าซจากการเผาไหม้จะเท่ากับ

$$\phi = 1 - f^3 \quad (3)$$

โดย ϕ เพิ่มขึ้นจาก 0 จนถึง 1 สมการอัตราการเผาไหม้แสดงตามสมการ

$$r_b = \beta P^\alpha \quad (4)$$

โดยที่ r_b คือ อัตราการเผาไหม้

β คือ สัมประสิทธิ์อัตราการเผาไหม้

P คือ ความดันรังเพลิง

α คือ เลขชี้กำลังความดัน

สมการที่ (4) สามารถใช้ได้ถ้า α มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย

ตัวแปรไม่มีหน่วย M แทนตัวแปรชีปนวิจกลาง (central ballistic parameter) แสดงถึงความสัมพันธ์ของความดันรังเพลิงกับการเคลื่อนตัวของกระสุนปืนแสดงโดยสมการ

$$M = \frac{A^2 D^2 \left(1 + \frac{C}{3w_1}\right) G}{\beta^2 w_1 c \lambda \left(1 + \frac{C}{2w_1}\right)^2} \quad (5)$$

โดยที่ λ คือ พลังงานดินขับ (propellant force)

A คือ พื้นที่หน้าตัดลำกล้องปืน

w_1 คือ น้ำหนักกระสุนสุทธิ (effective weight)

ความดันรังเพลิงในกรณีของดินปืนแบบทรงกระบอกแสดงโดยสมการด้านล่างนี้

$$P = \frac{\lambda c \left(1 + \frac{C}{2w_1}\right)}{V_i \left(1 + \frac{C}{3w_1}\right)} (1 - f) e^{-M(1-f)} \quad (6)$$

โดยที่ V_i คือ ปริมาตรเริ่มต้นของรังเพลิง

สำหรับในกรณีของดินปืนแบบทรงกลม ความดันรังเพลิง หาได้จากสมการ

$$P = \frac{\lambda c R_L}{V_i (1-f^3)} \left\{ \exp \left[\frac{2M}{\sqrt{3}} \left(\tan^{-1} \left(\frac{1+2f}{\sqrt{3}} \right) + \left(\frac{\pi}{3} \right) \right) \right] \right\} \quad (7)$$

โดยที่ R_L คือ อัตราส่วนลากรองจ์

สมการระยะทางของกระสุนเคลื่อนที่ไป แบ่งเป็นสองกรณีเช่นกัน ได้แก่ กรณีดินปืนทรงกระบอก ($\theta = 0$)

$$x + l = l e^{M(1-f)} \quad (8)$$

กรณีดินปืนทรงกลม ($\theta = 1.4$)

$$x + l = l \exp \left[-\frac{2M}{\sqrt{3}} \left(\tan^{-1} \left(\frac{1+2f}{\sqrt{3}} \right) - \left(\frac{\pi}{3} \right) \right) \right] \quad (9)$$

โดยที่ x คือ ระยะทางกระสุนเคลื่อนที่

l คือ ความยาวห้องรังเพลิง

โดยการอินทิเกรตสมการการเคลื่อนที่ สมการความเร็วลูกกระสุนในช่วงที่ดินปืนเผาไหม้แสดงโดย

$$v = \frac{AD}{\beta \left(w_1 + \frac{1}{2} C \right)} (1-f) \quad (10)$$

ภายหลังการเผาไหม้ดินปืนหมดลง สมการความดันที่สอดคล้องภายในรังเพลิงกลายเป็น

$$P = P_B f^Y \quad (11)$$

สมการความเร็วกลายเป็น

$$v^2 = \frac{\lambda c (M + \Phi)}{w_1 + \frac{C}{3}} \quad (12)$$

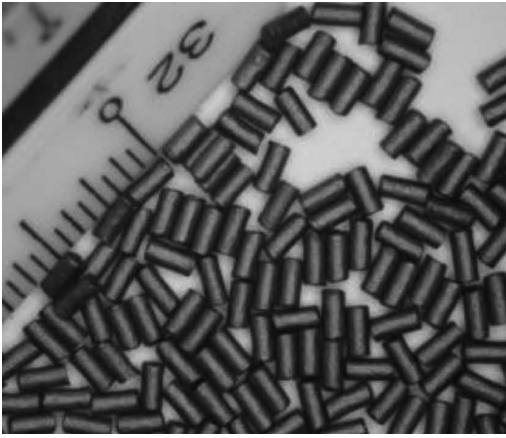
โดยที่ r คือ สัดส่วนระยะทางต่อระยะเผาไหม้สิ้นสุด

Y คือ อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ

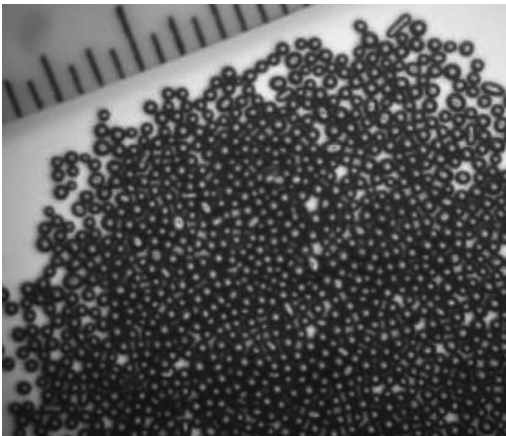
θ คือ ตัวแปรเสริม

3. การดำเนินงานวิจัย

เพื่อประโยชน์ของการนำไปใช้งานกระสุนปืน ขนาด 5.56 มม. สำหรับปืนประจำกายแบบต่างๆ ของกองทัพบกและหน่วยงานตำรวจ งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างดินปืนแบบทรงกระบอก (single perforated grain) มีลักษณะตามรูปที่ 1 กับดินปืนรูปทรงกลม (spherical grain) การเปรียบเทียบคุณลักษณะของความดันรังเพลิงเทียบกับเวลา ความเร็วกระสุนเทียบระยะทาง และความดันรังเพลิงเทียบกับระยะทาง



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) ดินปืนทรงกระบอก (ข) ดินปืนทรงกลม

ด้วยขนาดของดินปืนมีความแตกต่างกันในแต่ละเม็ด ขนาดที่ใช้ในการคำนวณ จึงใช้ขนาดเฉลี่ย โดยอิงตามมาตรฐานสหรัฐอเมริกา (US classified) โดยขนาดของดินปืนเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งของการเผาไหม้ดินปืนและมีผลต่อความดันรังเพลิง

การคำนวณเชิงตัวเลขอาศัยหลักการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง การเผาไหม้แบบถดถอย (burn back characteristic) เกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวเปิดของดินปืน ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัยด้านขีปนาวุธภายใน [5], [6] โดยแบบจำลองเชิงตัวเลขดังกล่าวสามารถนำไปใช้ร่วมกับข้อมูลเชิงวิศวกรรมจากคู่มือมาตรฐานทางทหารเพื่อเพิ่มความถูกต้องของผลการคำนวณ [8], [10]

การคำนวณเริ่มด้วยการกำหนดระยะ $x_s = 0.0004 \text{ mm}$ จากนั้นคำนวณหาค่า x_i

$$x_i = x_{i-1} + x_s \quad (13)$$

สำหรับดินปืนทรงกระบอก คำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในนอก D_i เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน d_i และความยาว L_i โดยสมการ

$$D_i = D_o - 2x_i \quad (14)$$

$$d_i = d_o + 2x_i \quad (15)$$

$$L_i = L_o - 2x_i \quad (16)$$

$$Q_i = \frac{\eta \rho_p}{C} \left[\frac{\pi}{4} (D_{i-1}^2 - d_{i-1}^2) L_{i-1} - \frac{\pi}{4} (D_i^2 - d_i^2) L_i \right] + Q_{i-1} \quad (17)$$

$$f_i = 1 - Q_i \quad (18)$$

สำหรับดินปืนทรงกลม

$$R_i = R_o - x_i \quad (19)$$

$$Q_i = \frac{\eta \rho_p}{C} \left[\frac{4}{3} \pi (R_{i-1}^3 - R_i^3) \right] + Q_{i-1} \quad (20)$$

$$f_i = (1 - Q_i)^{1/3} \quad (21)$$

เมื่อคำนวณหาสัดส่วนดินปืนคงเหลือ f แล้วสามารถคำนวณหาความดันรังเพลิงได้จากสมการ (6) และ (7) จากนั้นคำนวณความเร็วและระยะทางจากสมการ (8), (9) และ (10) คำนวณอัตราเผาไหม้ r_i จากสมการ (4) สามารถคำนวณเวลาในขั้นถัดไปจาก

$$t_i = \frac{x_s}{r_i} + t_{i-1} \tag{22}$$

การคำนวณข้างต้นสามารถทำได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานทั่วไป การเปรียบเทียบระหว่างดินปืนสองลักษณะ และกระสุนสองประเภทได้แก่ กระสุน M193 และ กระสุน M855 คุณสมบัติของดินปืนที่ใช้ในการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 1 คุณสมบัติของกระสุนปืนแต่ละแบบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดินปืน

Parameters	Propellant Type		Reference
	Single Perforated Grain	Spherical	
Propellant force	1,144,765 J/kg	1,144,765 J/kg	Ref [8]
Density	1.55 g/cm ³	1.55 g/cm ⁴	Ref [3]
Ratio of specific heat	1.26	1.26	Ref [3]
Burn rate coefficient	3.4037	3.4037	Ref [8]
Burn rate exponent	0.8	0.8	Ref [8]
Form factor	0	1.4	Ref [3]
Web thickness	0.345 mm	0.85 mm	Ref [13]
Outer diameter	0.85 mm	0.85 mm	Ref [13]
Inner diameter	0.16 mm	-	Ref [13]
Length	2.14 mm	-	Ref [13]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของปืนและกระสุนปืน

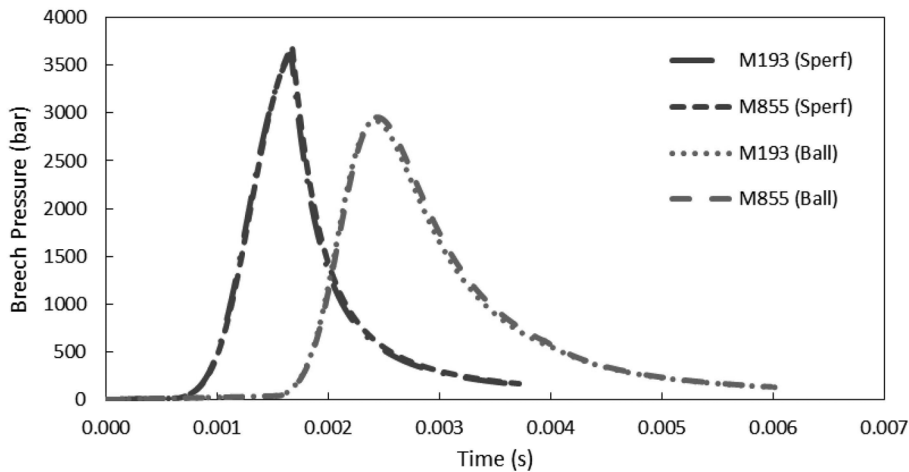
Parameters	Cartridge Type		Reference
	M193	M855	
Bore diameter	5.70 mm	5.70 mm	Ref [12]
Chamber length	112 mm	112 mm	Ref [12]
Projectile weight	56 gr	62 gr	Ref [10]
Charge weight	26.5 gr	26.1 gr	Ref [10]
Barrel length 11.5"/14.5"	292/368 mm	292/368 mm	Ref [12]
Twist rate	32 Caliber	32 Caliber	Ref [12]
Radius of gyration	1.90 mm	1.90 mm	Ref [1]

4. ผลการคำนวณชิปนวิธิภายใน

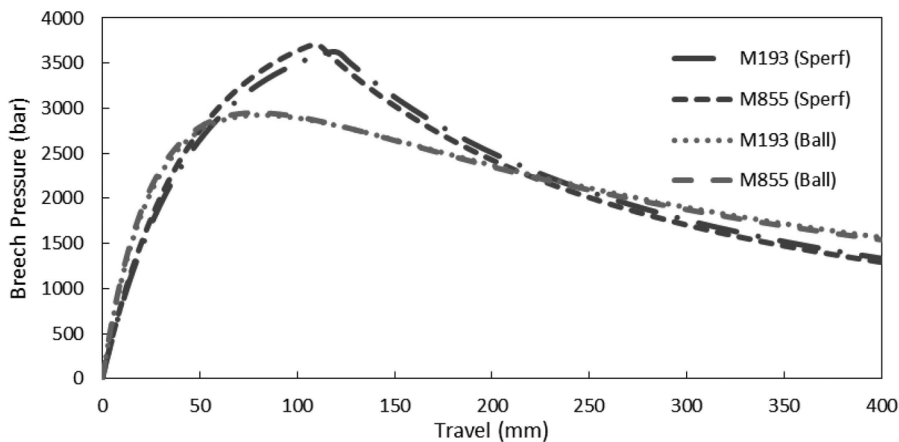
การคำนวณชิปนวิธิภายในเป็นการคำนวณเปรียบเทียบความดันภายในรังเพลิงต่อเวลา แสดงตามรูปที่ 2 ผลการคำนวณความเร็วกระสุนปืนต่อระยะทางเคลื่อนที่แสดงตามรูปที่ 3 และผลการคำนวณความดันรังเพลิงต่อระยะทางเคลื่อนที่แสดงตามรูปที่ 4 ค่าผลการคำนวณเปรียบเทียบกระสุนทุกแบบรวบรวมนำแสดงตามตารางที่ 3 จากการคำนวณตามรูปที่ 2 ความดันต่อเวลา การคำนวณระหว่างดินปืนทั้งสองแบบ พบว่าดินปืนแบบทรงกระบอก มีความหนาเว็บ 0.345 mm มีการเพิ่มขึ้นของความดันได้เร็วกว่า และมีค่าความดันสูงสุดมากกว่าดินปืนแบบทรงกลมที่มีความหนาเว็บ 0.85 mm แสดงถึงความหนาเว็บน้อยกว่าจะทำให้

ความดันรังเพลิงสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกระสุน M193 ปริมาณดินปืนที่ใช้เท่ากับ 26.5 gr เท่ากัน ดินปืนแบบทรงกระบอกมีความดันสูงสุด 3,618 bar ดินปืนแบบทรงกลมที่มีความดันสูงสุด 2,924 bar เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระสุนปืนสองชนิดพบว่า M855 มีค่าความดันสูงสุดมากกว่า M193 โดยที่ปริมาณดินปืน M855 ใช้ดินปืนน้อยกว่าเล็กน้อย

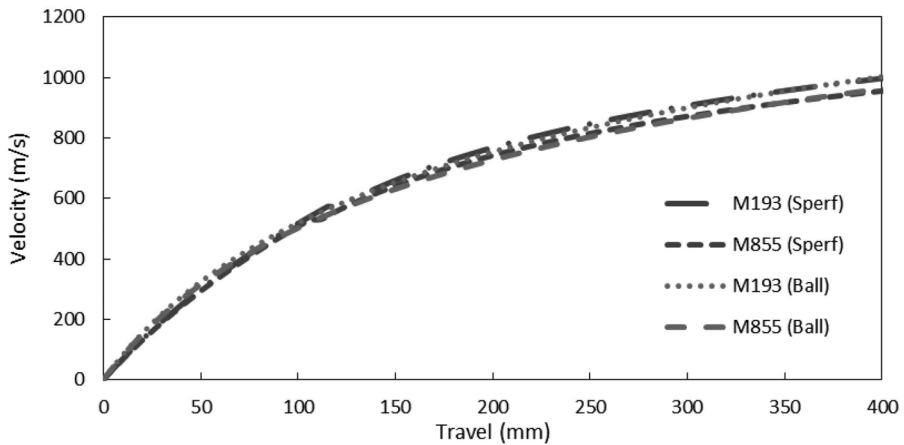
ผลการคำนวณที่ได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองและข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงทางวิศวกรรมชิปนวิธิภายใน [4], [8] แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถอธิบายพฤติกรรมของความดันและความเร็วของกระสุนได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 2 กราฟความดัน-เวลา ของกระสุนสี่แบบ



รูปที่ 3 กราฟความดัน-ระยะทาง ของกระสุนสี่แบบ



รูปที่ 4 กราฟความเร็วกระสุน-ระยะทางของกระสุนสี่แบบ

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณเปรียบเทียบกระสุนและดินปืนชนิดต่าง ๆ

Parameters	Single Perforated Grain		Ball (Spherical) Grain	
	M193 (Sperf)	M855 (Sperf)	M193 (Ball)	M855 (Ball)
Projectile Weight, gr	56	62	56	62
Charge Weight ,gr	26.5	26.1	26.5	26.1
Muz Velocity,11.5" m/s(ft/s)	894(2,976)	861(2,868)	889(2,960)	854(2,844)
Muz Velocity,14.5" m/s(ft/s)	967(3,222)	927(3,086)	971(3,233)	932(3,105)
Max Breech Pressure, Bar	3,618	3,689	2,924	2,955
Burn Time, sec	0.0017	0.0017	0.0040	0.0039
Ballistic Efficiency, 11.5" %	19.2	20.1	19.0	19.8
Ballistic Efficiency, 14.5" %	22.6	23.3	22.7	23.6

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างกระสุนแต่ละแบบ

Test Result	Cartridge Type		Reference
	M193	M855	
Muz Velocity,11.5" m/s(ft/s)	843(2,766)	830(2,723)	Ref [12]
Muz Velocity,14.5" m/s(ft/s)	991(3,250)	922(3,025)	Ref [10]
Max Breech Pressure, Bar	3,585	3,792	Ref [10]

พิจารณารูปที่ 3 การเพิ่มขึ้นของความดันต่อระยะทางการเคลื่อนที่ของกระสุนปืน พิจารณากระสุน M193 ดินปืนแบบทรงกระบอก ความดันสูงสุด 3,618 bar ที่ระยะทาง 120 mm ในขณะที่ดินปืนแบบทรงกลม ความดันสูงสุด 2,924 bar ที่ระยะทาง 75 mm หลังจากกระสุนผ่านจุดที่ความดันสูงสุดไปแล้ว ความดันรังเพลิงจะค่อยๆ ลดลงตามระยะทางของกระสุน รูปที่ 4 แสดงกราฟความเร็วกระสุนต่อระยะทาง พบว่าความเร็วกระสุนเพิ่มขึ้นตามระยะทางกระสุนเคลื่อนที่ โดยที่ความเร็วกระสุนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเพิ่มขึ้นช้าลงในช่วงหลังเนื่องจากความดันที่ลดลง

พิจารณาตารางที่ 3 กระสุน M193 ความยาว 11.5 นิ้ว ดินปืนแบบทรงกระบอก มีความเร็วต้น 894 m/s ประสิทธิภาพ 19.2 % ดินปืนแบบทรงกลมมีความเร็วต้น 889 m/s ประสิทธิภาพ 19.0 % แสดงว่าดินปืนแบบทรงกระบอกมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบทรงกลม ในกรณีของดินปืนชนิดเดียวกัน พิจารณาดินปืนแบบทรงกระบอกกระสุน M193 น้ำหนัก 56 gr มีประสิทธิภาพ 19.2 % ในขณะที่กระสุน M855 หนัก 62 gr มีความเร็วต้น 861 m/s ประสิทธิภาพเท่ากับ 20.1 % นั่นคือกระสุน M855 มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ M193 กรณีการเปรียบเทียบความเร็วของกระสุนของปืนความยาวลำกล้องปืนต่างกัน พบว่าขนาดความยาวลำกล้องยาว 14.5 นิ้ว มีความเร็วต้นและประสิทธิภาพสูงกว่าปืนลำกล้องยาว 11.5 นิ้ว การเปรียบเทียบกับผลการทดสอบความเร็วต้นและความดันรังเพลิงในตารางที่ 4 พบว่าผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ

5. บทสรุป

การคำนวณปืนวิถีภายในลำกล้องปืนขนาด 5.56x45 mm โดยอาศัยหลักการเผาไหม้บนพื้นที่ผิวของดินปืน เราสามารถคำนวณความดันรังเพลิง ความเร็วกระสุนปืน ระยะทางการเคลื่อนที่ของกระสุน รวมถึงประสิทธิภาพของกระสุนแบบต่าง ๆ จากการเปรียบเทียบระหว่างกระสุนที่ใช้ดินปืนทรงกระบอก (single perforated grain) และดินปืนแบบทรงกลม (spherical grain) พบว่าดินปืนทรงกระบอกมีความเร็วต้นและประสิทธิภาพสูงกว่าดินปืนแบบทรงกลมอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงมีความดันรังเพลิงสูงกว่าและเวลาที่สั้นกว่า ผลการคำนวณมีลักษณะเดียวกันสำหรับกระสุน M193 และ M855 ในกรณีดินปืนชนิดเดียวกัน กระสุน M855 มีประสิทธิภาพสูงกว่า M193 เนื่องจากน้ำหนักที่มากกว่า M193 ในกรณีความยาวลำกล้องพบว่าปืนลำกล้องยาวมีความเร็วและประสิทธิภาพสูงกว่าปืนลำกล้องสั้น

การคำนวณข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ ในหน่วยผู้ใช้งาน รวมถึงการพัฒนาอาวุธปืนที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น อย่างไรก็ตามข้อมูลการทดสอบที่ช่วยยืนยันผลการคำนวณมีความจำเป็น สำหรับการปรับปรุงความถูกต้องของตัวแปรต่าง ๆ รูปแบบของดินปืนแบบอื่น ๆ ที่มีผลต่อความดันรังเพลิงในลักษณะแตกต่างกันไป จำเป็นต้องมีการคำนวณและทดสอบเพิ่มเติม

ผลการคำนวณในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ขีปนาวุธวิถีภายในของกระสุนขนาด 5.56 มม. [7] ซึ่งยืนยันถึงความถูกต้องของแบบจำลองที่นำมาใช้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะผู้บริหาร นักวิจัยที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ รวมถึงผู้เกี่ยวข้อง ของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่มีส่วนสนับสนุนในงานวิจัยจนสำเร็จ
ลุล่วง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. M. Corner, Theory of the Interior Ballistics of Guns. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1950.
- [2] T. Vasile, "The fundamental problem solving of interior ballistics using the physical law of powder burning," AARMS, vol. 3, no. 3, pp. 407–414, 2004.
- [3] D. E. Carlucci and S. S. Jacobson, Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition. New York, NY, USA: Taylor & Francis, 2018.
- [4] P. O. Cronemberger, "Theoretical and experimental study of interior ballistics of a 7.62 mm rifle," Thermal Engineering, vol. 13, no. 2, pp. 20–27, 2014.
- [5] M. Akcay, "Internal and transitional ballistic solution for spherical and perforated propellants and verification with experimental results," Journal of Thermal Science and Technology, vol. 37, no. 1, pp. 35–44, 2017.
- [6] P. G. Baer and J. M. Frankle, "The simulation of interior ballistics performance of guns by digital computer program," Interior Ballistics Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, USA, 1962.
- [7] S. Palasarn, "The numerical analysis of the interior ballistic of a 5.56 mm gun," Defence Technology Academic Journal, vol. 7, no. 15, pp. 46–55, 2025. (in Thai)
- [8] U.S. Army Materiel Command, Engineering Design Handbook: Interior Ballistics of Guns. Huntsville, AL, USA, 1965.
- [9] U.S. Army Materiel Command, Engineering Design Handbook: Recoilless Rifle Weapon Systems. Alexandria, VA, USA, 1976.
- [10] Headquarters, Department of the Army, Army Ammunition Data Sheets: Small Caliber Ammunition, TM 43-0001-27. Washington, DC, USA, 1996.
- [11] Infantry Battalion, Chulachomklao Royal Military Academy, Infantry Unit Weapons Manual. Nakhon Nayok, Thailand. (in Thai)
- [12] EMTAN, "MZ-4P 11.5 Rifle: Caliber 5.56 mm NATO Automatic Rifle with piston operating system," [Online]. Available: <https://emtan.co.il/products/MZ-4p-11-5/>. [Accessed: Apr. 17, 2026].

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการตรวจจับฉนวนไฟฟ้าด้วยโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับหุ่นยนต์ทำความสะอาดฉนวนผ่าน MQTT โดยประมวลผลบน CPU

ผกามาศ วงศ์สาย^{1*} วรากร เลื่องลือวุฒิ^{1,2} พันศักดิ์ เทียนวิบูลย์² กิตติกร วิริยะศาสตร์¹
อุบล รัชสถาพรวัฒนา¹ ชนาธิป ชื่นมนัส¹ และ พันธุ์เทพ แก้วมงคล¹

วันที่รับ 2 กันยายน 2568 วันที่แก้ไข 9 มีนาคม 2569 วันที่ตอบรับ 17 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

การตรวจจับวัตถุ (Object Detection) เป็นกระบวนการที่ใช้เทคนิคจากโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านการมองเห็นของหุ่นยนต์ (Robot Vision) งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ทำความสะอาดฉนวนไฟฟ้า (Insulator Cleaning Robot) โดยระบบจะรับภาพจากกล้องเพื่อตรวจหาพิกัด Bounding Box ของเป้าหมาย ก่อนส่งข้อมูลไปยังหน่วยควบคุม หุ่นยนต์ผ่านการสื่อสารไร้สายแบบ MQTT โดยการทดสอบดำเนินการบน CPU 6-Core Intel Xeon E5 ความเร็ว 3.5 GHz พร้อม RAM ขนาด 16 GB โดยไม่ใช้ GPU ในการประมวลผล ผลการเปรียบเทียบหลายสถาปัตยกรรม โมเดลพบว่า YOLOv11n ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ด้วยค่า mAP@0.5 = 97.6% และ Precision = 98.66% ความเร็วเฉลี่ยของระบบ (รวมทั้งการประมวลผลและส่งข้อมูล) อยู่ที่ 1.61 FPS แม้จะต่ำกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ซึ่งมีความเร็ว 24 - 51 FPS แต่ระบบที่พัฒนาขึ้นมีจุดเด่นในการส่งพิกัดเป้าหมายล่วงหน้า 0.62 วินาที ทำให้หน่วยควบคุมสามารถเคลื่อนที่ตามพิกัดได้โดยไม่ต้องพึ่งพาภาพแบบเรียลไทม์ในทุกขั้นตอน นอกจากนี้ เวลารวมในการประมวลผลและส่งข้อมูลคิดเป็นเพียง 52% ของเวลาทั้งหมดต่อเฟรม แสดงให้เห็นว่าระบบมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริง แม้จะทำงานด้วย CPU เพียงอย่างเดียวก็ตาม

คำสำคัญ: การตรวจจับวัตถุ, โครงข่ายประสาทเทียม, หุ่นยนต์ทำความสะอาด, ฉนวนไฟฟ้า, การประมวลผลบนซีพียู, MQTT

¹ ส่วนงานวิศวกรรมการสื่อสารข้อมูลทางอิเล็กทรอนิกส์และเครือข่ายคอมพิวเตอร์, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้แต่ง, อีเมล: pakamaj.w@dti.or.th

Preliminary Study on Neural Network-Based Insulator Detection for an Insulator-Cleaning Robot via MQTT with CPU-Based Processing

Pakamaj Wongsai^{1*} Warakorn Luangluewut^{1,2} Phunsak Thiennviboon² Kittakorn Viriyasatr¹
Ubon Thongsatapornwatana¹ Chanatip Chuenmanus¹ and Pantape Kaewmongkol¹

Received 2 September 2025 Received 9 March 2026 Accepted 17 March 2026

Abstract

Object detection is a process that utilizes techniques from neural networks, which have gained significant popularity in robot vision research. This study applies such techniques to an insulator cleaning robot, where images from a camera are processed to determine the target's bounding box coordinates. The coordinates are then transmitted to the robot's control unit via long-range wireless communication using MQTT. The experiments were conducted on a 6-Core Intel Xeon E5 CPU (3.5 GHz) with 16 GB of RAM, without using a GPU for model inference. Among several tested architectures, YOLOv11n delivered the best performance, achieving an mAP@0.5 of 97.6% and a precision of 98.66%. The overall system speed (including both inference and data transmission) averaged 1.61 FPS. While this is slower than previous research reporting 24-51 FPS, the developed system offers a unique advantage: it can transmit target coordinates 0.62 seconds in advance, allowing the control unit to navigate toward the target without relying on real-time image processing at every step. Furthermore, the combined processing and transmission time accounted for only 52% of the total per-frame time, demonstrating the system's suitability for practical applications—even when running solely on a CPU.

Keywords: Object Detection, Neural Network, Cleaning Robot, Insulator, MQTT Communication

¹ Data Communication Division, Defence Technology Institute

² Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: pakamaj.w@dti.or.th

1. บทนำ

การพัฒนาหุ่นยนต์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม [1] การทำให้ระบบสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติต้องอาศัยองค์ประกอบหลายด้าน ทั้งระบบควบคุม (Control) [2] และระบบการมองเห็นด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Vision) [3] ในการทดลองครั้งนี้มุ่งเน้นที่ส่วนของ Computer Vision โดยนำหลักการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) [4] มาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ฉีดน้ำทำความสะอาดฉนวนไฟฟ้า (Insulator Cleaning Robot)

หลักการทำงานคือ การใช้ Object Detection เพื่อระบุตำแหน่งของฉนวนไฟฟ้า (Insulator) จากภาพที่ได้ แล้ววัดความไวของระบบ เพื่อหาวิธีให้สามารถทำงานแบบ Real-Time ภายใต้ข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์ที่ใช้ ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีการนำ Object Detection มาประยุกต์ใช้ร่วมกับแขนกลและหุ่นยนต์อย่างแพร่หลาย [5], [6] โดยส่วนใหญ่ทดสอบบนระบบ GPU ซึ่งให้ความเร็วสูงถึง 24 - 51 FPS อย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านั้นมักไม่สามารถควบคุมจากระยะไกลได้เนื่องจากไม่มีระบบส่งข้อมูลไร้สาย อีกทั้งยังมีต้นทุนสูงจากการใช้ GPU

ในงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้โมเดล YOLO ซึ่งมีความเร็วและความแม่นยำสูง [7] ร่วมกับ MQTT ซึ่งเป็นโพรโทคอลการส่งข้อความแบบน้ำหนักเบา (Lightweight Messaging Protocol) ที่เหมาะสำหรับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ในระบบ Internet of Things (IoT) โดยข้อมูลตำแหน่งของฉนวนไฟฟ้าที่ตรวจจับได้จะถูกส่งผ่าน MQTT ไปยังระบบควบคุม เพื่อให้แขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของฉนวนได้อย่างแม่นยำ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันงานด้าน Object Detection มีโมเดลให้เลือกใช้อย่างหลากหลาย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้ตระกูล YOLO (You Only Look Once) เนื่องจากมีจุดเด่นด้านความเร็วและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้กับระบบที่ต้องทำงานแบบ Real-time

นอกจากนี้ งานวิจัยยังศึกษาว่า ระดับการขยายขนาดโมเดล (Model Scaling) ของ YOLO ระดับใด

เหมาะสมที่สุดกับระบบที่ได้ออกแบบไว้ ภายใต้ข้อจำกัดด้าน ปริมาณชุดข้อมูลสำหรับฝึก (Training Dataset Size) และ ต้นทุนการคำนวณ (Computational Cost) เนื่องจากโมเดลแต่ละสเกลให้ประสิทธิภาพแตกต่างกันตามลักษณะและขนาดของข้อมูลฝึก หากเลือกโมเดลที่มีขนาดใหญ่เกินความเหมาะสมเมื่อเทียบกับชุดข้อมูลที่มี อาจเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโอเวอร์ฟิตติง (Overfitting) และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการใช้งานจริงลดลงได้

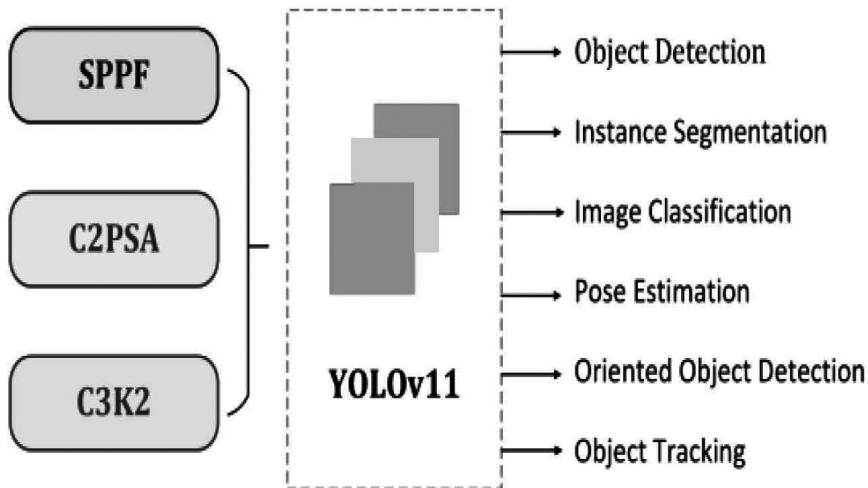
ดังนั้น ในงานนี้จึงทำการเปรียบเทียบโมเดล YOLO หลายสเกลเพื่อคัดเลือกโมเดลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบ โดยพิจารณาาร่วมกันทั้งด้าน ความไว และ ค่าหน่วยเวลา (Latency) เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคงค่าดีเลย์ต่ำที่สุด ตามข้อกำหนดของการใช้งานจริง

2.1 การทำ Object Detection ด้วย YOLO

ปัจจุบันการทำ Object Detection มีการพัฒนาโมเดลหลากหลายประเภท เช่น SSD [8], RetinaNet [9] และ YOLO [10] ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ YOLO เนื่องจากมีความเร็วและประหยัดทรัพยากรมากกว่าโมเดลอื่น งานวิจัยก่อนหน้านี้มีการพัฒนา YOLO ออกมาหลายรุ่น [11] และถูกประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน เช่น Segmentation [12], [13], Classification [14], Pose Estimation [15] และ Object Detection [16] โดยการทดลองในครั้งนี้มุ่งเน้นการใช้งานด้าน Object Detection สำหรับการทดสอบ ได้เลือกใช้ YOLOv11 เพื่อวัดทั้งความแม่นยำและความเร็ว ซึ่ง YOLOv11 [17] มาพร้อมสถาปัตยกรรมที่ปรับปรุงใหม่ โดยในส่วน Backbone ใช้ C3k2 block (Cross-Stage Partial with kernel size 2) แทน C2f แบบเดิม เพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์และเพิ่มความเร็ว ด้วยการใช้ Convolution ขนาดเล็กหลายชั้นแทนชั้นใหญ่ เสริมด้วย SPPF (Spatial Pyramid Pooling — Fast) และ C2PSA (Cross-Stage Partial with Spatial Attention) เพื่อเพิ่ม Spatial Attention ให้ระบบสามารถโฟกัสพื้นที่สำคัญ เช่น วัตถุขนาดเล็กหรือวัตถุที่ถูกบัง ส่วน Neck ใช้ C3k2 blocks แทน C2f เพื่อรวมฟีเจอร์หลายระดับได้รวดเร็ว และประหยัดทรัพยากร พร้อมผสม C2PSA เพื่อเพิ่ม

ความสามารถในการตรวจจับในฉากที่ซับซ้อน ส่วน Head ใช้ C3k2 blocks แบบหลายเส้นทาง (Multi-scale Path) เพื่อประมวลผลพีเจอร้อย่างมีประสิทธิภาพ รองรับการทำนายหลายขนาด (Multi-scale inference) สำหรับการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ได้แม่นยำมากขึ้น โดย Head เป็นส่วนที่ทำ Object

Detection โดยตรง ผ่าน Convolution และ Prediction Layers เพื่อทำนายตำแหน่งกรอบวัตถุ (Bounding Box), ค่าความมั่นใจ (Confidence Score) และประเภทของวัตถุ (Class Probability) จากพีเจอรที่ส่งมาจาก Backbone และ Neck ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างของ YOLOv11 [18]

2.2 Model scaling

YOLO (You Only Look Once) [19] เป็นโมเดล Deep Learning ที่ได้รับความนิยมอย่างสูง เหมาะสำหรับการตรวจจับวัตถุแบบเวลาจริง (Real-time) โดยยังคงความแม่นยำในระดับสูง สถาปัตยกรรมของ YOLO แปลงปัญหาการตรวจจับวัตถุให้เป็นปัญหาเชิงถดถอย (Regression Problem) ทำให้สามารถจำแนกประเภท (Classification) และหาตำแหน่ง (Localization) ของวัตถุได้พร้อมกันภายในการประมวลผลเพียงรอบเดียว [19]

ผลลัพธ์ของ YOLO อยู่ในรูปเทนเซอร์ (Tensor Outputs) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลกรอบสี่เหลี่ยม (Bounding Boxes) ที่คาดการณ์ไว้ ได้แก่ ตำแหน่ง ขนาด และค่าความมั่นใจ (Confidence Score) รวมถึงความน่าจะเป็นของคลาส (Conditional Class Probabilities) ของวัตถุที่ตรวจจับได้ เวอร์ชันถัด ๆ มาของ YOLO ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพ [17], [18] โดยสามารถจัดการกับฉากที่ซับซ้อนและปรับใช้กับงานตรวจจับที่หลากหลายได้อย่างยืดหยุ่น เฟรมเวิร์ก YOLO จึงถูกพัฒนาต่อเนื่องเพื่อรองรับการปรับแต่งสำหรับงานเฉพาะทาง โดยหนึ่งในเทคนิคสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพคือ การปรับสเกลโมเดล (Model Scaling) [20] ซึ่งเป็นการปรับขนาดสถาปัตยกรรมอย่างเป็นระบบ เพื่อสร้างสมดุลระหว่างความแม่นยำและความเร็ว

การปรับสเกลโมเดลโดยทั่วไปประกอบด้วย

- **การปรับความลึก (Depth scaling):** เพิ่มจำนวนชั้น (Layers) ในโครงข่าย เพื่อให้สามารถเรียนรู้คุณลักษณะที่ซับซ้อนขึ้นผ่าน Convolutional Layers ที่เพิ่มขึ้น [21]
- **การปรับความกว้าง (Width Scaling):** เพิ่มจำนวนหน่วยต่อชั้น เช่น เพิ่มจำนวนตัวกรอง (Convolutional Filters) เพื่อขยายขอบเขตการดึงคุณลักษณะในแต่ละชั้น

ในการทดลองครั้งนี้ ได้ทำการทดสอบการปรับสเกลโมเดล YOLO จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ Nano, Small, และ Extra เพื่อครอบคลุมเล็ก-กลาง-ใหญ่สุดภายใต้ข้อจำกัด CPU และดู trade-off latency โดยพบว่าประสิทธิภาพของโมเดลจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของโมเดล แต่ความเร็ว (Latency) จะลดลงเมื่อใช้โมเดลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

จากตารางที่ 1 ซึ่งสรุปแนวคิด Model Scaling ของโมเดลที่ผ่านการฝึกบนชุดข้อมูล COCO พบว่าแต่ละโมเดลมี จำนวนพารามิเตอร์ (Parameters) และต้นทุนการคำนวณ (FLOPs) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งในกระบวนการฝึก โมเดลสามารถประยุกต์ใช้ Data Augmentation ในตัวได้ ส่งผลให้รูปแบบข้อมูลระหว่างการฝึกมีความหลากหลายมากขึ้น

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของ Model Scaling ในแต่ละตัว [18]

Model	size (pixels)	mAP ^{val} 50-95	Speed CPU ONNX (ms)	Speed T4 TensorRT10 (ms)	params (M)	FLOPs (B)
YOLO11n	640	39.5	56.1 ± 0.8	1.5 ± 0.0	2.6	6.5
YOLO11s	640	47	90.0 ± 1.2	2.5 ± 0.0	9.4	21.5
YOLO11m	640	51.5	183.2 ± 2.0	4.7 ± 0.1	20.1	68
YOLO11l	640	53.4	238.6 ± 1.4	6.2 ± 0.1	25.3	86.9
YOLO11x	640	54.7	462.8 ± 6.7	11.3 ± 0.2	56.9	194.9

โดยภาพรวม แนวโน้มชี้ให้เห็นว่า โมเดลที่มีขนาดใหญ่ยิ่งให้ความแม่นยำสูงขึ้น อย่างไรก็ตามความสามารถในการตรวจจับได้ครบถ้วนหรือความไวอาจลดลงเมื่อขนาดโมเดลเพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนถึง Trade-off ระหว่างประสิทธิภาพด้านความถูกต้องกับการครอบคลุมการตรวจจับ นอกจากนี้ โมเดลขนาดใหญ่โดยทั่วไปเหมาะกับสถานการณ์ที่มีปริมาณข้อมูลฝึกจำนวนมาก ขณะที่โมเดลขนาดเล็กมักเหมาะกับชุดข้อมูลขนาดเล็กมากกว่า หากเลือกขนาดโมเดลไม่สอดคล้องกับลักษณะและปริมาณข้อมูลอาจนำไปสู่ปัญหาโอเวอร์ฟิตติง (Overfitting) ได้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินและเปรียบเทียบว่า โมเดลขนาดใดเหมาะสมที่สุดกับข้อจำกัดและเงื่อนไขการใช้งานของระบบที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อให้ได้สมดุลระหว่างความแม่นยำ ความไว และต้นทุนการคำนวณในการใช้งานจริง

2.3 การส่งข้อมูลผ่าน MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) [22] สื่อสารแบบ publish-subscribe

ที่ใช้สถาปัตยกรรมโดยมี Broker ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง Publisher และ Subscriber จุดเด่นของ MQTT คือน้ำหนักเบา (Lightweight) ใช้พลังงานต่ำ และเหมาะสำหรับเครือข่ายที่มีแบนด์วิดท์จำกัด ในการทดลองนี้ได้ใช้ MQTT เพื่อส่งข้อมูลผลการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) และส่งภาพของฉนวนไฟฟ้า (Insulator) ที่ตรวจจับได้ไปยังระบบควบคุม เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถนำพิกัดที่ได้รับไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ได้แม่นยำ

2.4 Confusion Matrix

Confusion Matrix [23] เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับประเมินประสิทธิภาพของ โมเดลจำแนกประเภท (Classification Model) โดยใช้การแสดงผลการทำนายของโมเดลว่าถูกหรือผิดในแต่ละคลาส ซึ่งช่วยให้วิเคราะห์ข้อผิดพลาดและประสิทธิภาพของโมเดลได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2

	Actually Positive (1)	Actually Negative (0)
Predicted Positive (1)	True Positives (TPs)	False Positives (FPs)
Predicted Negative (0)	False Negatives (FNs)	True Negatives (TNs)

รูปที่ 2 Confusion Matrix

2.4.1 ความแม่นยำ (Precision) เป็นการวัดความแม่นยำของแบบจำลองจากการพิจารณาแยกทีละผลลัพธ์ โดยคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\frac{TP_s}{TP_s + FP_s} \quad (1)$$

โดย IoU (Intersection over Union) มักใช้ในงานตรวจจับวัตถุ (Object Detection) หรือการแบ่งส่วนภาพ (Image Segmentation) เพื่อวัดความแม่นยำเชิงพื้นที่ โดยนิยามเป็นอัตราส่วนของพื้นที่ที่ทำนายได้ถูกต้อง (True Positive หรือ Intersection) ต่อพื้นที่รวมทั้งหมด (Union) ของพื้นที่ที่บวกจริง (Actual Positive) กับพื้นที่บวกที่โมเดลทำนายว่าเป็นบวก (Predicted Positive) ดังสมการที่ (2)

$$\frac{TP_s}{TP_s + FP_s + FN_s} \quad (2)$$

2.4.2 Average Precision (AP50) ของแต่ละคลาสดังสมการที่ (3)

$$\int_0^1 P(R) dR \quad (3)$$

คือการคำนวณจริง ใช้วิธีหาพื้นที่ใต้กราฟ Precision-Recall (PR curve) โดยใช้ข้อมูลที่คัดจาก $IoU \geq 0.50$

2.4.3 Mean Average Precision (mAP50)

$$mAP50 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N AP_{i50} \quad (4)$$

โดย

N = จำนวนคลาสทั้งหมด

AP_{i50} = Average Precision ของคลาสเมื่อ

$IoU \text{ threshold} \geq 0.50$

3. วิธีการดำเนินการ

3.1 การออกแบบระบบหุ่นยนต์ทำความสะอาดฉนวนไฟฟ้า (Insulator Cleaning Robot)

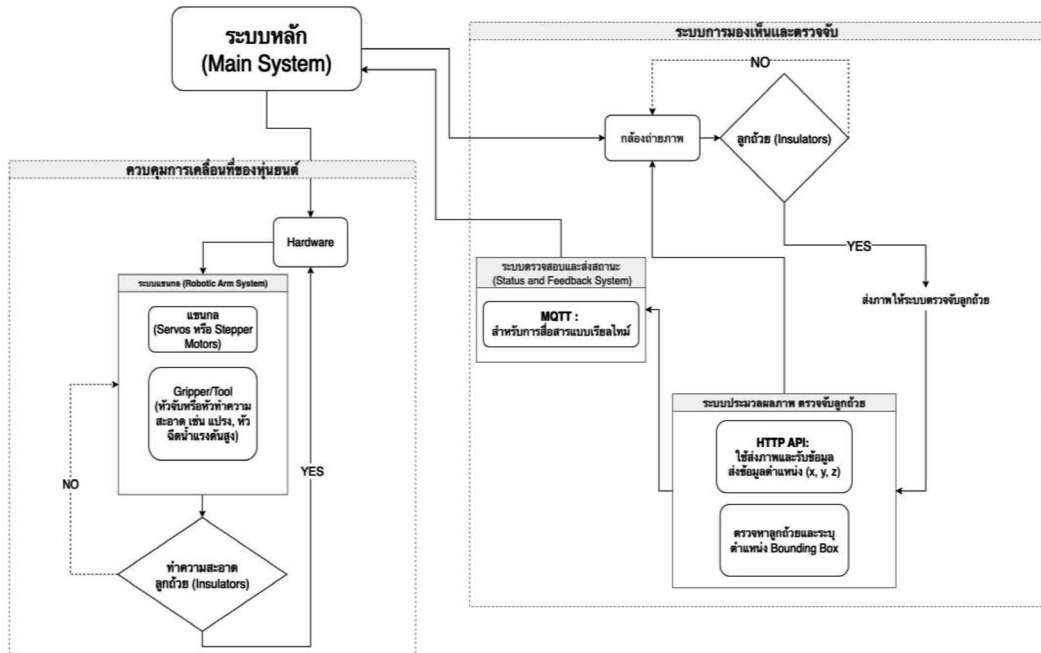
การออกแบบระบบหุ่นยนต์ทำความสะอาดฉนวนไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

1. ระบบการมองเห็น (Vision System)

ทำหน้าที่รับภาพจากกล้องและประมวลผลด้วยโมเดล Object Detection เพื่อหาพิกัด bounding box ของฉนวนไฟฟ้า จากนั้นจะส่งข้อมูลพิกัดและภาพที่ตรวจจับได้ผ่านโปรโตคอล MQTT ไปยังระบบหลัก



รูปที่ 3 ตัวอย่างหุ่นยนต์ทำความสะอาด Insulator



รูปที่ 4 โครงสร้างระบบหุ่นยนต์ทำความสะอาด Insulator

2. ระบบควบคุม (Control System) รับข้อมูล พิกัด Bounding Box จากระบบการมองเห็น เพื่อนำไปใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้ตรงกับตำแหน่งของฉนวนไฟฟ้าอย่างแม่นยำ ในการทดลองได้ทำการวัดความเร็ว (Latency) ของการประมวลผลภาพและการส่งข้อมูลจากระบบการมองเห็น เพื่อให้ค่าดังกล่าวสอดคล้องกับความเร็วในการทำงานของระบบควบคุมโครงสร้างโดยรวมของระบบแสดง ดังแสดงในรูปที่ 3 และ รูปที่ 4

3.2 การเลือก Dataset มาทำการทดลอง

ข้อมูลที่ใช้มาทดสอบคือ ข้อมูลจาก Roboflow [24] โดยมีภาพทั้งหมด 1249 ภาพ โดยทำการแบ่งเป็นข้อมูล Train 874 ภาพ Validation 251 ภาพ และข้อมูลที่ Test 124 ภาพโดยข้อมูลชุด Test เราจะนำไปทดสอบของโมเดลทั้งหมด 3 โมเดล และหาความไวที่โมเดลใช้ในการหาพิกัด และความไวในการส่งของข้อมูลโดยใช้ MQTT

3.3 การหาความไวและความแม่นยำของระบบกล้อง และระบบส่งข้อมูล

ในการทดลองด้วย YOLOv11 ได้ทำการปรับ Model Scaling จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ Nano, Small

และ Extra เพื่อประเมินความเร็วในการทำงานบน CPU โดยใช้ 6-Core Intel Xeon E5 @ 3.5 GHz พร้อม RAM ขนาด 16 GB และไม่ใช่ GPU ในการประมวลผลโมเดล เนื่องจากข้อจำกัดด้านฮาร์ดแวร์

การวัดประสิทธิภาพประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1. ความเร็วจากการประมวลผลโมเดลในการหาพิกัดของฉนวนไฟฟ้า (Insulator)
2. ความเร็วจากการส่งข้อมูลผ่าน MQTT นอกจากนี้ยังทำการวัดค่า mAP@0.5 เพื่อประเมินความแม่นยำของโมเดลทั้ง 3 ขนาด โดยทดสอบบนชุดข้อมูล Test Set ที่เตรียมไว้

4. ผลการทดลอง

4.1 การทดลองประสิทธิภาพของแต่ละโมเดล (Model)

จากการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของ MQTT พบว่าโมเดลแต่ละขนาดให้ค่า mAP@0.5 ใกล้เคียงกัน แต่ YOLOv11n ให้ค่าที่สูงที่สุด เนื่องจากชุดข้อมูลที่เพิ่มความซับซ้อนต่ำ ทำให้ YOLOv11n มีการ overfit น้อยกว่าโมเดลอื่น ๆ นอกจากนี้ ระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของโมเดลและการส่งข้อมูลผ่าน MQTT

มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยรวมคิดเป็น 52% ของเวลาทั้งหมด ต่อเฟรม แสดงว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมบน CPU ซึ่งช่วยประหยัดต้นทุนฮาร์ดแวร์

หากใช้ GPU เพื่อเร่งความเร็วในการประมวลผลระบบอาจทำงานช้าลงเนื่องจากข้อจำกัดของการส่งข้อมูลผ่าน MQTT อย่างไรก็ตาม การนำ MQTT มาใช้ช่วยให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์จากระยะไกลระหว่างระบบควบคุมและระบบการมองเห็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองสรุปดังแสดงในตารางที่ 2

4.2 ประสิทธิภาพ ของ YOLOv11n

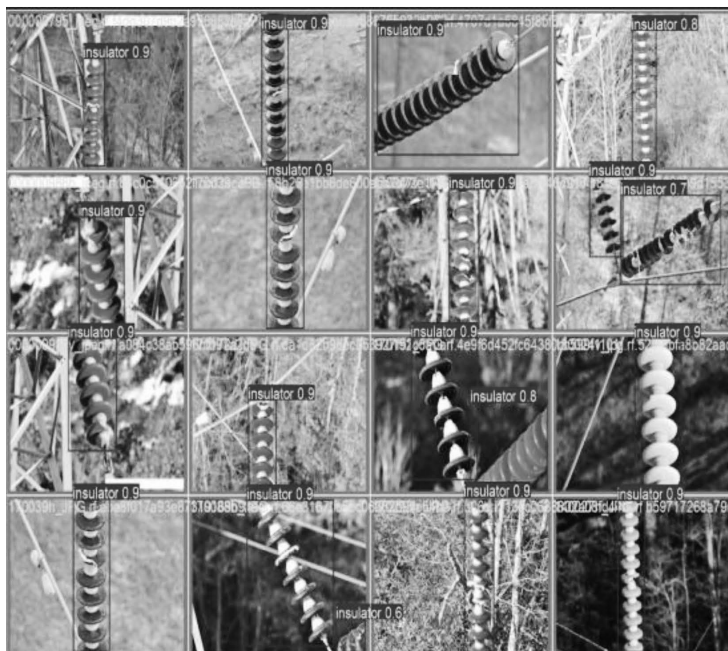
จากการทดลองประสิทธิภาพของแต่ละโมเดลพบว่า YOLOv11n ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดทั้งด้านความเร็วและความแม่นยำ ในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงการตรวจ

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของโมเดลแต่ละตัว

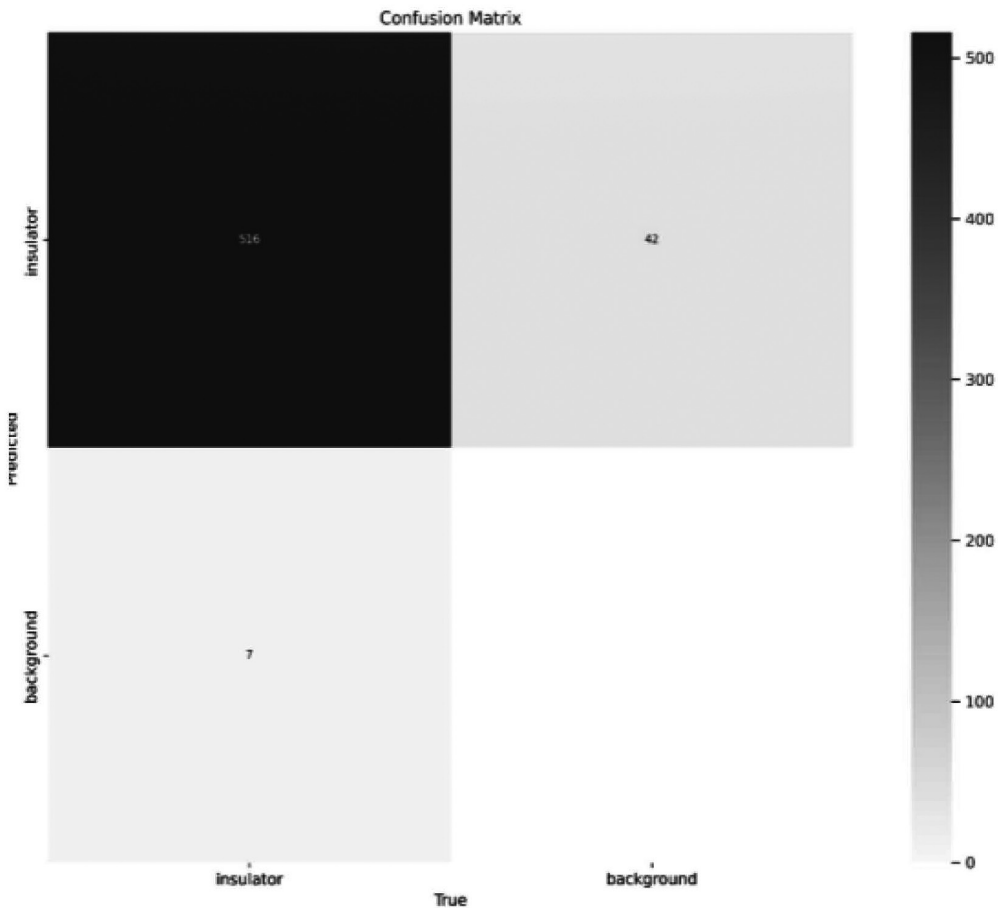
Model	mAP@0.5	Time (Model) [s]	Time (MQTT) [s]	Time Total [s]	FPS Total
YOLOv11n	0.976	0.32	0.30	0.62	1.61
YOLOv11s	0.973	0.44	0.32	0.76	1.32
YOLOv11x	0.974	1.59	0.29	1.88	0.53

จับ Insulator ได้อย่างถูกต้อง และรูปที่ 6 ซึ่งเป็นผลจาก Confusion Matrix โดยมีค่า True Positive จำนวน 516 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 565 ตัวอย่าง คิดเป็นความแม่นยำ 98.66% และมีค่า mAP50 สูงถึง 97.6% เมื่อใช้ร่วมกับระบบการมองเห็นมีความไวเท่ากับ 0.62 วินาทีต่อเฟรมซึ่งต่ำกว่า

งานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีความไว 24-51 FPS อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้านี้ไม่มีการส่งข้อมูลแบบไร้สายระยะไกลเหมือนระบบที่ออกแบบ โดยระบบจะส่งภาพและพิกัดเป้าหมายไปยังหน่วยควบคุมล่วงหน้า 0.62 วินาที ก่อนที่หน่วยควบคุมจะประมวลผลและขับเคลื่อนตามพิกัด โดยไม่จำเป็นต้องรอข้อมูลภาพแบบเรียลไทม์ในทุกขั้นตอน



รูปที่ 5 ตัวอย่างการตรวจจับ Insulator ด้วย YOLOv11n



รูปที่ 6 Confusion Matrix ของ YOLOv11n

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบโมเดลตรวจจับวัตถุหลายรุ่นพบว่า YOLOv11n ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีความแม่นยำ (Precision) 98.66%, ค่าความถูกต้องเชิงพื้นที่ (mAP50) 97.6% และจำนวน True Positive 516 ตัวอย่าง จากข้อมูลทั้งหมด 565 ตัวอย่าง ความเร็วการประมวลผลภาพอยู่ที่ 1.61 FPS ซึ่งต่ำกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มีความเร็ว 24-51 FPS อย่างไรก็ตาม ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความโดดเด่นตรงที่สามารถส่งข้อมูลภาพและพิกัดเป้าหมายแบบไร้สายระยะไกลได้ และ

ถูกออกแบบให้ส่งพิกัดล่วงหน้า 0.62 วินาที ก่อนการเคลื่อนที่จริง ทำให้หน่วยควบคุมสามารถประมวลผลและขับเคลื่อนตามพิกัดที่ได้รับ โดยไม่ต้องรอข้อมูลภาพแบบเรียลไทม์ในทุกขั้นตอน นอกจากนี้ เวลาที่ใช้ในการประมวลผลของโมเดลและการส่งข้อมูลผ่าน MQTT มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยรวมคิดเป็นประมาณ 52% ของเวลาทั้งหมดในหนึ่งเฟรม ซึ่งถือว่าเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน เนื่องจากสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ใช้เพียง CPU

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Arents and M. Greitans, "Smart industrial robot control trends, challenges and opportunities within manufacturing," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 2, p. 937, 2022.
- [2] M. Casini, D. Prattichizzo, and A. Vicino, "The automatic control telelab," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 36-44, 2004.
- [3] J. Qi et al., "Computer vision-based hand gesture recognition for human-robot interaction: a review," *Complex & Intelligent Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 1581-1606, 2024.
- [4] Z. Zou et al., "Object detection in 20 years: A survey," *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 3, pp. 257-276, 2023.
- [5] C. Ju et al., "Speed-FairMOT: multi-class multi-object tracking for real-time manipulation," *Signal, Image and Video Processing*, 2025.
- [6] Y. Ye et al., "Dynamic and real-time object detection based on deep learning for home service robots," *Sensors*, vol. 23, no. 23, p. 9482, 2023.
- [7] L. He et al., "Research and application of YOLOv11-based object segmentation," *Buildings*, vol. 14, no. 12, p. 3777, 2024.
- [8] S. Zhai et al., "DF-SSD: An improved SSD object detection algorithm," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 24344-24357, 2020.
- [9] Y. Wang et al., "Automatic ship detection based on RetinaNet," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 5, p. 531, 2019.
- [10] P. Jiang et al., "A review of YOLO algorithm developments," *Procedia Computer Science*, vol. 199, pp. 1066-1073, 2022.
- [11] M. Sportelli et al., "Evaluation of YOLO object detectors for weed detection," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 14, p. 8502, 2023.
- [12] W. Luangluewut et al., "Performance Comparison of LRT and YOLO," *Defence Technology Academic Journal*, 2025.
- [13] C. Kang and S. Kim, "Real-time object detection and segmentation technology," *JMST Advances*, vol. 5, no. 2, pp. 69-76, 2023.
- [14] T. Diwan et al., "Object detection using YOLO," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 82, no. 6, pp. 9243-9275, 2023.
- [15] D. Maji et al., "YOLO-pose," *CVPR*, pp. 2637-2646, 2022.
- [16] W. Luangluewut et al., "Domain Adaptation for Drone Detection," *ICAIC*, 2025.
- [17] R. Khanam and M. Hussain, "YOLOv11: An overview," *arXiv*, 2024.
- [18] G. Jocher et al., "Ultralytics YOLO11," *GitHub*, 2024.
- [19] J. Redmon et al., "You Only Look Once," *CVPR*, pp. 779-788, 2016.
- [20] M. Tan et al., "EfficientDet," *CVPR*, pp. 10781-10790, 2020.
- [21] B. Mehlig, *Machine Learning with Neural Networks*. Cambridge University Press, 2021.
- [22] OASIS, "MQTT Version 3.1.1," 2014.
- [23] S. Visa et al., "Confusion Matrix-based Feature Selection," *CEUR Workshop Proc.*, 2011.
- [24] Roboflow, "Insulator Detection Dataset," 2023.

การพัฒนาระบบ Web Application Firewall (WAF) อัจฉริยะที่ใช้ Machine Learning ในการตรวจจับและป้องกันการโจมตี

เผด็จ สวิพันธุ์¹ และ ทิภาพร ศุภมิตร²

วันที่รับ 20 ธันวาคม 2568 วันที่แก้ไข 6 มีนาคม 2569 วันที่ตอบรับ 11 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบ Web Application Firewall (WAF) อัจฉริยะ โดยประยุกต์ใช้เทคนิค Machine Learning และ Deep Learning เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับและป้องกันการโจมตีทางเว็บ โดยโมเดลที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยเทคนิคในกลุ่ม Machine Learning ได้แก่ Random Forest และ Support Vector Machine (SVM) และเทคนิคในกลุ่ม Deep Learning ได้แก่ Deep Neural Network (DNN) ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้ข้อมูลจากชุด CIC-IDS2017 Dataset และ OWASP Benchmark Dataset สำหรับการฝึกสอนและทดสอบ โมเดลการเรียนรู้ ผลการทดลองพบว่า โมเดล Deep Neural Network (DNN) ซึ่งเป็นเทคนิคในกลุ่ม Deep Learning มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยให้ค่าความแม่นยำเฉลี่ย 97.60% และค่า F1-Score เท่ากับ 96.65% สูงกว่าโมเดลในกลุ่ม Machine Learning ได้แก่ Random Forest และ SVM ระบบ WAF ที่พัฒนาขึ้นเชื่อมต่อกับโมเดลผ่าน RESTful API และสามารถตรวจจับการโจมตีได้แบบเรียลไทม์ โดยมีเวลาเฉลี่ยในการตอบสนองเพียง 120 มิลลิวินาที ผลการทดสอบการทำงานของระบบพบว่า ระบบมีความแม่นยำในการตรวจจับการโจมตีเฉลี่ย 96.10% และผู้ใช้งานมีระดับความพึงพอใจต่อระบบอยู่ในระดับ “มากที่สุด” (ค่าเฉลี่ย 4.53 จาก 5) โดยเฉพาะในด้านความถูกต้องของการตรวจจับและความรวดเร็วในการตอบสนอง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้เทคนิค Deep Learning โดยเฉพาะโมเดล Deep Neural Network (DNN) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับการโจมตีทางเว็บได้สูงกว่าเทคนิคในกลุ่ม Machine Learning และมีศักยภาพในการนำไปพัฒนาเป็นเครื่องมือด้านความปลอดภัยไซเบอร์ที่สามารถตรวจจับการโจมตีทั้งแบบที่เคยรู้จักและไม่เคยรู้จักมาก่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การป้องกันการโจมตีทางเว็บ, การเรียนรู้ของเครื่อง, ไฟร์วอลล์แอปพลิเคชันเว็บ, การตรวจจับการบุกรุก, ปัญญาประดิษฐ์

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมซอฟต์แวร์และระบบสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

² สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

* ผู้แต่ง, อีเมล: tipaporn.sup@kbu.ac.th

Development of an Intelligent Web Application Firewall (WAF) Using Machine Learning for Attack Detection and Prevention

Padet Sawipan^{1*} and Thipaporn Suphamit²

Received 20 December 2025 Received 6 March 2026 Accepted 11 March 2026

Abstract

This research Development of an Intelligent Web Application Firewall (WAF) Using Machine Learning for Attack Detection and Prevention. The models used in this research consist of Machine Learning techniques, including Random Forest and Support Vector Machine (SVM), and a Deep Learning technique, namely Deep Neural Network (DNN). The system was trained and evaluated using data from the CIC-IDS2017 Dataset and the OWASP Benchmark Dataset. The experimental results indicate that the Deep Neural Network (DNN) model, which belongs to the Deep Learning group, achieved the highest performance, with an average accuracy of 97.60% and an F1-Score of 96.65%, outperforming the Machine Learning models, namely Random Forest and SVM. The developed WAF system is integrated with the trained model through a RESTful API and is capable of detecting web attacks in real time, with an average response time of 120 milliseconds. The system evaluation results show that the developed system achieved an average detection accuracy of 96.10%. In addition, user satisfaction with the system was at the highest level (mean score of 4.53 out of 5), particularly in terms of detection accuracy and response speed. The findings demonstrate that the application of Deep Learning techniques, especially the Deep Neural Network (DNN) model, can significantly enhance the effectiveness of web attack detection compared to traditional Machine Learning techniques. Furthermore, the proposed system shows strong potential as a cybersecurity tool capable of accurately detecting both known and previously unseen web attacks.

Keywords: Web attack prevention, Machine learning, Web application firewall, Intrusion detection, Artificial intelligence

¹ Department of Software Engineering and Information Systems, Faculty of Science and Technology, Pathumwan Institute of Technology Thailand

² Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Kasembundit University

* Corresponding author: tipaporn.sup@kbu.ac.th

1. บทนำ

ในยุคดิจิทัลปัจจุบัน การพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศได้มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการขับเคลื่อนภาคธุรกิจ เศรษฐกิจ และการบริหารจัดการของภาครัฐ โดยเฉพาะ “เว็บแอปพลิเคชัน (Web Application)” ซึ่งได้กลายเป็นโครงสร้างพื้นฐานหลักในการดำเนินงานและการให้บริการต่าง ๆ เว็บแอปพลิเคชันช่วยให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลและบริการได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และสามารถใช้งานได้จากทุกที่ทุกเวลา ไม่ว่าจะผ่านคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ หรืออุปกรณ์อัจฉริยะอื่น ๆ ปัจจุบันองค์กรทั้งภาครัฐและเอกชนได้นำระบบเว็บแอปพลิเคชันมาใช้ในการให้บริการลูกค้า การดำเนินธุรกรรมทางการเงิน การจัดการฐานข้อมูล และการบริหารงานภายในองค์กรอย่างแพร่หลาย

อย่างไรก็ตาม การพึ่งพาระบบเว็บแอปพลิเคชันในระดับสูงย่อมมาพร้อมกับความเสี่ยงด้านความปลอดภัยไซเบอร์ (Cyber Security) เนื่องจากระบบเหล่านี้มักเปิดให้เข้าถึงผ่านเครือข่ายสาธารณะ เช่น อินเทอร์เน็ต ซึ่งทำให้ผู้ไม่ประสงค์ดีสามารถใช้ช่องโหว่ของระบบเพื่อเข้าถึงข้อมูลสำคัญขององค์กรได้ ปัจจุบันรูปแบบการโจมตีทางไซเบอร์มีความซับซ้อนและหลากหลายมากขึ้น จากรายงานของ OWASP (Open Web Application Security Project) ได้ระบุประเภทของการโจมตีที่พบบ่อยในเว็บแอปพลิเคชัน เช่น SQL Injection, Cross-Site Scripting (XSS), Cross-Site Request Forgery (CSRF) และ Remote File Inclusion (RFI) ซึ่งเป็นภัยคุกคามที่สามารถก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อระบบสารสนเทศขององค์กร [1]

การโจมตีเหล่านี้มีลักษณะและวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น SQL Injection เป็นการแทรกคำสั่ง SQL ที่เป็นอันตรายผ่านช่องรับข้อมูลของระบบเพื่อเข้าถึงหรือแก้ไขข้อมูลในฐานข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาต ส่วน Cross-Site Scripting (XSS) เป็นการฝังโค้ดสคริปต์ลงในหน้าเว็บเพื่อขโมยข้อมูลของผู้ใช้หรือเปลี่ยนเส้นทางไปยังเว็บไซต์ที่เป็นอันตราย ขณะที่ Cross-Site Request Forgery (CSRF) ใช้เทคนิคหลอกให้ผู้ใช้ที่กำลังเข้าสู่ระบบอยู่ทำการกระทำบางอย่างโดยไม่รู้ตัว เช่น การเปลี่ยนรหัสผ่านหรือการโอนเงิน ส่วน Remote File Inclusion (RFI) เป็นการแทรกไฟล์

จากภายนอกเข้าสู่ระบบเพื่อรันคำสั่งที่เป็นอันตราย ซึ่งอาจนำไปสู่การรั่วไหลของข้อมูลหรือความเสียหายต่อระบบได้

เพื่อป้องกันภัยคุกคามดังกล่าว จึงมีการพัฒนาเครื่องมือด้านความปลอดภัยที่เรียกว่า Web Application Firewall (WAF) ซึ่งเป็นระบบที่ทำหน้าที่ตรวจสอบและกรองคำร้องขอ (Request) ที่ส่งมายังเว็บเซิร์ฟเวอร์ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบหลัก โดย WAF จะวิเคราะห์รูปแบบข้อมูล พฤติกรรมของผู้ใช้ และพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อระบุว่าคำร้องขอนั้นมีลักษณะของการโจมตีหรือไม่ หากตรวจพบความผิดปกติ ระบบจะทำการบล็อกคำร้องขอนั้นทันที เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบ [2]-[4]

อย่างไรก็ตาม WAF แบบดั้งเดิม (Traditional WAF) ส่วนใหญ่ใช้หลักการตรวจจับแบบกฎเกณฑ์ (Rule-Based) หรือการตรวจสอบจากลายเซ็นการโจมตี (Signature-Based) ซึ่งต้องอาศัยฐานข้อมูลของรูปแบบการโจมตีที่เคยเกิดขึ้นมาก่อน แม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะสามารถตรวจจับการโจมตีที่รู้จักแล้ว (Known Attacks) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดในการตรวจจับการโจมตีรูปแบบใหม่ที่ไม่เคยปรากฏมาก่อน หรือที่เรียกว่า Zero-Day Attacks รวมทั้งอาจเกิดปัญหาการตรวจจับผิดพลาด เช่น False Positive และ False Negative ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบ [5]

จากข้อจำกัดของระบบแบบดั้งเดิม นักวิจัยหลายท่านจึงได้ศึกษาการนำเทคนิค Machine Learning และ Deep Learning มาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับการโจมตีของเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูลและการตรวจจับพฤติกรรมที่ผิดปกติ ตัวอย่างเช่น Dawadi และคณะ [6] ได้พัฒนา Web Application Firewall ที่ใช้เทคนิค Deep Learning ในการตรวจจับการโจมตีทางเว็บ ซึ่งสามารถเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับได้สูงกว่าวิธีแบบเดิม ขณะที่ Betarte และคณะ [5] ได้เสนอการใช้โมเดล Machine Learning สำหรับการตรวจจับการโจมตีเว็บแอปพลิเคชัน และพบว่าสามารถจำแนกประเภทของการโจมตีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ Moradi Vartouni และคณะ [7] ได้นำ Deep Neural Network มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนา WAF ที่สามารถตรวจจับพฤติกรรมที่ผิดปกติของคำร้องขอจากผู้ใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ Ito และ Iyatomi [3] ได้ใช้ Convolutional Neural Network (CNN) ในการวิเคราะห์ข้อมูลคำร้องขอเว็บแอปพลิเคชัน และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับการโจมตีได้ดีขึ้น งานวิจัยของ Krishnan และคณะ [8] ยังได้เสนอการใช้โมเดล Deep Neural Network ร่วมกับเทคนิค Ensemble Learning เพื่อป้องกันการโจมตี Cross-Site Scripting ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูง

ในภาพรวม งานวิจัยหลายฉบับได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิค Deep Learning มีศักยภาพสูงในการตรวจจับภัยคุกคามด้านความปลอดภัยไซเบอร์ โดยสามารถวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลที่ซับซ้อนและตรวจจับพฤติกรรมที่ผิดปกติได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9]–[11] ซึ่งทำให้นำแนวทางใช้ Machine Learning และ Deep Learning กลายเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาระบบรักษาความปลอดภัยสำหรับเว็บแอปพลิเคชันในปัจจุบัน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนา “Web Application Firewall อัจฉริยะ (Intelligent WAF)” โดยประยุกต์ใช้เทคนิค Machine Learning และ Deep Learning เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับและป้องกันการโจมตีทางเว็บ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเรียนรู้รูปแบบพฤติกรรมของการใช้งานที่ปกติและผิดปกติจากข้อมูลจริง และสามารถตรวจจับการโจมตีที่ไม่เคยปรากฏมาก่อนได้ (Anomaly Detection) ซึ่งช่วยลดข้อจำกัดของระบบ WAF แบบดั้งเดิม

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้พัฒนาแดชบอร์ด (Dashboard) สำหรับผู้ดูแลระบบ เพื่อใช้ในการติดตามสถานะการทำงานของระบบ วิเคราะห์เหตุการณ์การโจมตี และแสดงข้อมูลเชิงสถิติที่เกี่ยวข้อง เช่น จำนวนคำร้องที่ถูกบล็อก ประเภทของการโจมตีที่ตรวจพบ และแนวโน้มของภัยคุกคาม เพื่อช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถตัดสินใจและตอบสนองต่อเหตุการณ์ด้านความปลอดภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีดำเนินงาน

งานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการดำเนินการออกเป็น 5 ระยะหลัก ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: การวิเคราะห์และเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection and Analysis)

1. ศึกษาข้อมูลลักษณะของการโจมตีบนเว็บ (Web Attacks) จากเอกสารทางวิชาการและฐานข้อมูลมาตรฐาน (CIC-IDS, OWASP, MITRE ATT&CK) [1], [5], [9]

2. คัดเลือกตัวแปร (Feature Selection) ที่สำคัญ เช่น HTTP Method, Request Size, URL Parameter, Response Code, Header Content-Type [12]

3. ทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) และแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบตัวเลขเพื่อป้อนเข้าสู่โมเดล

ขั้นตอนที่ 2: การออกแบบโมเดล Machine Learning (Model Design)

ในขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning Models) เพื่อใช้ในการตรวจจับและจำแนกการโจมตีของเว็บแอปพลิเคชัน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การเลือกอัลกอริทึม (Algorithm Selection) ผู้วิจัยเลือกใช้อัลกอริทึมที่เหมาะสมสำหรับการจำแนกและตรวจจับการโจมตีของเว็บแอปพลิเคชัน จำนวน 3 โมเดล ได้แก่

- Random Forest ใช้สำหรับการจำแนกข้อมูลแบบหลายคลาส (Multi-class Classification) โดยอาศัยการรวมผลลัพธ์จากต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Trees) หลายต้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนและเพิ่มความแม่นยำของการจำแนกข้อมูล

- Support Vector Machine (SVM) ใช้สำหรับการจำแนกข้อมูลและตรวจจับขอบเขตของพฤติกรรมที่ผิดปกติ โดยอาศัยหลักการหาขอบเขตการแบ่งข้อมูล (Hyperplane) ที่เหมาะสมที่สุดระหว่างข้อมูลแต่ละประเภท

• Deep Neural Network (DNN) ใช้สำหรับการวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลที่มีความซับซ้อนและการตรวจจับพฤติกรรมที่ผิดปกติของคำร้องขอ (Request) ที่ส่งมายังเว็บแอปพลิเคชัน โดยสามารถเรียนรู้ลักษณะเชิงลึกของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7]

โครงสร้างของโมเดล Deep Neural Network (DNN) โมเดล DNN ที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย Input Layer, Hidden Layers และ Output Layer โดยมีรายละเอียดดังนี้

Input Layer รับข้อมูลคุณลักษณะ (Features) ที่ได้จากการประมวลผลชุดข้อมูล

Hidden Layer จำนวน 3 ชั้น ได้แก่

- Hidden Layer ที่ 1: 128 neurons ใช้ ReLU (Rectified Linear Unit) เป็น activation function

- Hidden Layer ที่ 2: 64 neurons ใช้ ReLU เป็น activation function

- Hidden Layer ที่ 3: 32 neurons ใช้ ReLU เป็น activation function

Output Layer ใช้ Softmax Activation Function สำหรับการจำแนกประเภทของการโจมตีแบบหลายคลาส นอกจากนี้ในการฝึกสอนโมเดลใช้ Adam Optimizer และใช้ Categorical Cross-Entropy เป็นฟังก์ชันสำหรับคำนวณค่าความสูญเสีย (Loss Function) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนรู้ของโมเดล

2) การแบ่งชุดข้อมูล (Dataset Splitting)

ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน เพื่อใช้ในการฝึกสอนและประเมินประสิทธิภาพของโมเดล ดังนี้

ส่วนที่ 1 Training Set จำนวน 70% ของข้อมูลทั้งหมด ใช้สำหรับฝึกสอนโมเดล

ส่วนที่ 2 Validation Set จำนวน 15% ของข้อมูลทั้งหมด ใช้สำหรับปรับแต่งพารามิเตอร์ของโมเดล และป้องกันปัญหา Overfitting

ส่วนที่ 3 Test Set จำนวน 15% ของข้อมูลทั้งหมด ใช้สำหรับทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของโมเดลหลังจากการฝึกสอนเสร็จสิ้น

ขั้นตอนที่ 3 การพัฒนาและฝึกสอนโมเดล (Model Training)

ในขั้นตอนนี้ดำเนินการฝึกสอนโมเดล Random Forest, Support Vector Machine (SVM) และ Deep Neural Network (DNN) โดยใช้ชุดข้อมูล Training Set ที่ได้จากการเตรียมข้อมูล เพื่อให้โมเดลสามารถเรียนรู้รูปแบบของข้อมูลปกติและข้อมูลที่เป็นการโจมตีของเว็บแอปพลิเคชัน

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดล ผู้วิจัยใช้เทคนิค k-Fold Cross-Validation โดยกำหนดค่า $k = 5$ (5-fold Cross-Validation) ซึ่งเป็นการแบ่งชุดข้อมูลฝึกสอนออกเป็น 5 ส่วน และทำการฝึกสอนโมเดล 5 รอบ โดยในแต่ละรอบจะใช้ข้อมูล 4 ส่วนสำหรับการฝึกสอน และอีก 1 ส่วนสำหรับการตรวจสอบผลลัพธ์ จากนั้นนำค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์ที่ได้มาใช้อธิบายประสิทธิภาพของโมเดล วิธีการนี้ช่วยลดความเอนเอียงของข้อมูล และช่วยป้องกันปัญหา Overfitting

นอกจากนี้ ผู้วิจัยใช้เทคนิค Grid Search เพื่อค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละโมเดล โดยกำหนดช่วงค่าพารามิเตอร์ เช่น Random Forest ($n_estimators = 100-300$, $max_depth = 10-30$), SVM (kernel = linear, rbf และ $C = 0.1-10$) และ DNN (batch_size = 32 หรือ 64 และ epochs = 50 หรือ 100)

หลังจากการฝึกสอนโมเดลแล้ว จะทำการประเมินประสิทธิภาพโดยใช้ชุดข้อมูล Test Set ผ่านตัวชี้วัด ได้แก่ Accuracy, Precision, Recall, F1-score และ ROC Curve เพื่อวิเคราะห์ความสามารถของโมเดลในการตรวจจับการโจมตีของเว็บแอปพลิเคชัน และใช้ผลลัพธ์ดังกล่าวในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละโมเดล เพื่อนำโมเดลที่มีประสิทธิภาพสูงสุดไปใช้ในระบบ Web Application Firewall ที่พัฒนาขึ้น.

ขั้นตอนที่ 4: การพัฒนาและเชื่อมต่อบนระบบ WAFอัจฉริยะ (Smart WAF Integration)

1. นำโมเดลที่ผ่านการฝึกสอนแล้วบูรณาการเข้ากับระบบ WAF ผ่าน REST API

2. ระบบมีความสามารถตรวจจับและบล็อกคำขอ (Request) แบบเรียลไทม์ได้

3. ส่วนแสดงผล (Dashboard) แสดงข้อมูลสถิติ เช่น จำนวนการโจมตี, ชนิดการโจมตี, สถานะการบล็อก, และการแจ้งเตือน (Alert)

ขั้นตอนที่ 5: การทดสอบและประเมินผลระบบ (System Evaluation)

1. ทดสอบระบบด้วยชุดข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน เพื่อวัดประสิทธิภาพจริง
2. ประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ (User Evaluation) โดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วน Likert 5 ระดับ
3. วิเคราะห์ผลการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพ ของระบบ

การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

การประเมินใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน ซึ่งเป็น

- นักศึกษา สาขาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ระบบสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
- อาจารย์ผู้เชี่ยวชาญด้านความปลอดภัยไซเบอร์
- เจ้าหน้าที่ IT ที่เกี่ยวข้องกับระบบเครือข่าย

แบบสอบถามประกอบด้วย 3 ด้านหลัก ได้แก่

1. ด้านความถูกต้องของการตรวจจับ
2. ด้านความสะดวกในการใช้งานระบบ
3. ด้านการแสดงผลของแดชบอร์ด
4. ด้านความเสถียรของระบบ และ
5. ด้านการตอบสนองของระบบ

ข้อมูลจากแบบสอบถามถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อประเมินระดับความพึงพอใจโดยรวมของผู้ใช้งาน

3. ผลและวิจารณ์ผล

ผลการพัฒนาระบบ

การพัฒนา ระบบ Web Application Firewall (WAF) อัจฉริยะ ที่ใช้ Machine Learning (ML) เป็นเครื่องมือหลักในการตรวจจับและป้องกันการโจมตีทางเว็บ ประกอบด้วยผลการดำเนินงานทั้งในด้าน การพัฒนาโมเดล, การบูรณาการระบบ, และผลการทำงานของระบบ ดังนี้

1. ผลการพัฒนาโมเดล Machine Learning

ในงานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการสร้างและทดสอบโมเดล Machine Learning 3 แบบ ได้แก่

1. Random Forest (RF)
2. Support Vector Machine (SVM)
3. Deep Neural Network (DNN)

ชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนคือ CIC-IDS2017 Dataset [13] และข้อมูลจำลองจากการโจมตีจริง (OWASP Benchmark) [1] รวมทั้งหมด 250,000 รายการ โดยแบ่งเป็น

- Training Set 70%
- Validation Set 15%
- Test Set 15%

ส่วนการเขียนโปรแกรม สำหรับโมเดล Machine Learning จะนำเข้าสู่ระบบ Server เป็น ภาษา Python (Flask) ดังรูปที่ 1 และผลการทดสอบประสิทธิภาพของโมเดล สรุปได้ดังตารางที่ 1

```
change.py
1 # train model.py
2 import pandas as pd
3 from sklearn.model_selection import train_test_split
4 from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
5 import joblib
6
7 # ตัวอย่างข้อมูลโจมตี (1 = attack, 0 = normal)
8 data = {
9     "payload_length": [10, 50, 100, 20, 5, 80],
10    "contains_sql": [0,1,1,0,0,1],
11    "contains_script": [0,0,1,0,0,1],
12    "label": [0,1,1,0,0,1]
13 }
14
15 df = pd.DataFrame(data)
16 X = df[["payload_length", "contains_sql", "contains_script"]]
17 y = df["label"]
18
19 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.3, random_state=42)
20 model = RandomForestClassifier()
21 model.fit(X_train, y_train)
22
23 print("Model Accuracy:", model.score(X_test, y_test))
24
25 # บันทึกโมเดล
26 joblib.dump(model, "waf_model.pkl")
27
```

รูปที่ 1 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม ภาษา Python (Flask) สำหรับโมเดล Machine Learning

ตารางที่ 1 ผลของการผลการทดสอบประสิทธิภาพของโมเดล

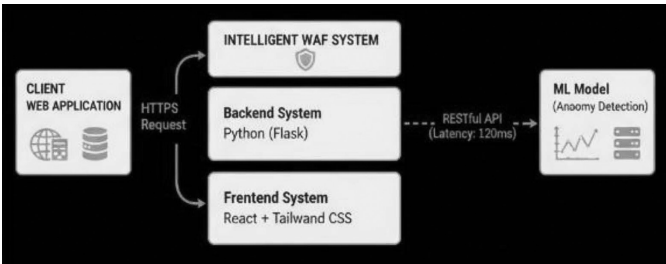
อัลกอริทึม	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score	ROC-AUC
Random Forest	96.25%	95.80%	94.10%	94.94%	0.978
SVM	91.40%	89.50%	90.10%	89.80%	0.942
DNN	97.60%	96.90%	96.40%	96.65%	0.986

จากตารางที่ 1 ผลการทดลอง พบว่าโมเดล DNN (Deep Neural Network) มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยให้ค่า Accuracy เฉลี่ย 97.60% และค่า F1-Score เท่ากับ 96.65% ซึ่งสูงกว่าโมเดลอื่นอย่างชัดเจน เพื่อยืนยันความแตกต่างของประสิทธิภาพระหว่างโมเดล ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบทางสถิติด้วยวิธี One-Way ANOVA เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวชี้วัดประสิทธิภาพระหว่างโมเดล Random Forest, SVM และ DNN จากผลการทดสอบพบว่าค่าประสิทธิภาพของโมเดลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบรายคู่เพิ่มเติมด้วย t-test เพื่อยืนยันว่าโมเดล DNN ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าโมเดลอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นในการพัฒนาระบบ Web Application Firewall (WAF) อัจฉริยะ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โมเดล DNN เป็นโมเดลหลักสำหรับการตรวจจับการโจมตีทางไซเบอร์

2. ผลการบูรณาการโมเดลกับระบบ WAF (System Integration Results)

โมเดล Machine Learning ถูกบูรณาการเข้ากับระบบ WAF Dashboard ที่พัฒนาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน โดยมีคุณสมบัติดังนี้

1. ระบบ Backend พัฒนาโดยใช้ Python (Flask) ทำหน้าที่รับข้อมูล Request จากเว็บแอปพลิเคชัน เป้าหมาย และส่งผ่านโมเดล Machine Learning เพื่อวิเคราะห์
2. ระบบ Frontend พัฒนาโดยใช้ React + Tailwind CSS เพื่อแสดงสถานะของการตรวจจับแบบเรียลไทม์
3. การเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างส่วน ML Model และ Dashboard ทำผ่าน RESTful API โดยมีเวลาเฉลี่ยในการตอบสนอง (Latency) เพียง 120 มิลลิวินาทีต่อ Request ดังรูปที่ 2



Key Features:

- Real-time Threat Detection
- Python (Flask Backend): Request Processing
- React + Tawlind CYSS Fortetand: Live Dashboard Dashboard
- RESTful API: Data Communication

Benefits

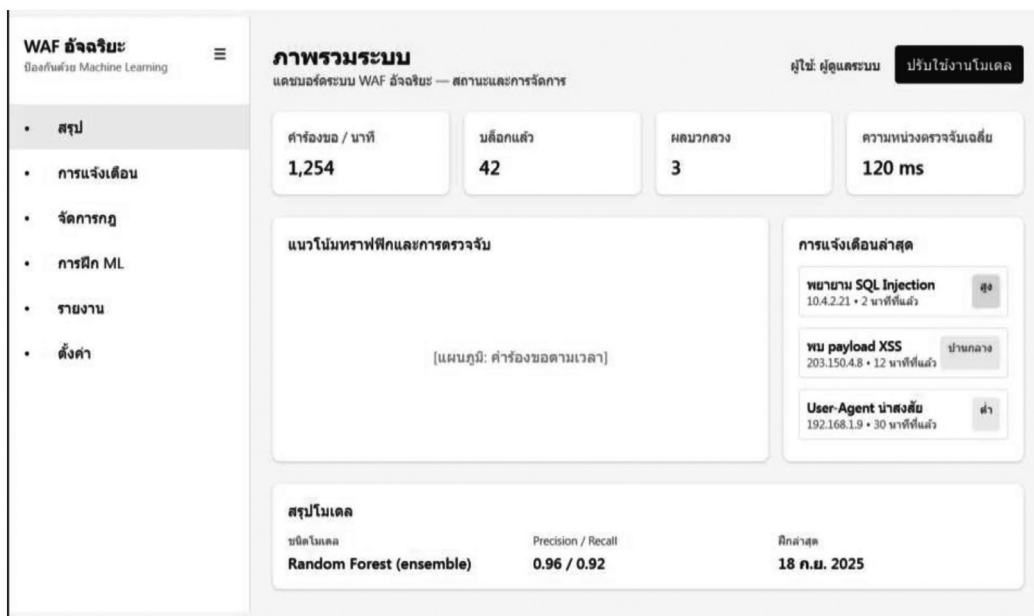
- Enhanced Security
- Protection Against Zero-Day Attacks
- Improved Accuracy (Reduced FPs/FNs)
- User-Friendly Monitoring Dashboard

รูปที่ 2 แสดงสถาปัตยกรรมระบบ Web Application Firewall (WAF) อัจฉริยะที่ใช้ Machine Learning ในการตรวจจับและป้องกันการโจมตี

ระบบ WAF ที่พัฒนาได้มีดังนี้

1. สามารถตรวจจับการโจมตีที่เกิดขึ้นแบบเรียลไทม์ได้ (Real-time Detection)
2. สามารถจำแนกประเภทของการโจมตี (Attack Classification) เช่น SQL Injection, XSS, RFI, CSRF, และปกติ (Normal Traffic) [9]

3. มีระบบแจ้งเตือน (Alert System) โดยแสดงผลในแดชบอร์ดในรูปแบบสีตามระดับความรุนแรง
4. ระบบสามารถเรียนรู้ข้อมูลใหม่ได้อัตโนมัติ (Incremental Learning) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจจับ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 หน้าจอ Dashboard ระบบ Web Application Firewall (WAF) อัจฉริยะที่ใช้ Machine Learning ในการตรวจจับและป้องกันการโจมตี

3. ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

เมื่อทดสอบระบบด้วยชุดข้อมูลจำลองจากการโจมตีจริง (จำนวน 10,000 รายการ) ดังตารางที่ 2 จากผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถตรวจจับ

การโจมตีได้อย่างแม่นยำ เฉลี่ย 96.10% โดยเฉพาะการโจมตี ประเภท RFI และ SQL Injection ซึ่งเป็นรูปแบบที่พบบ่อยประเภท RFI และ SQL Injection ซึ่งเป็นรูปแบบที่พบบ่อย

ตารางที่ 2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ Web Application Firewall (WAF) อัจฉริยะที่ใช้ Machine Learning ในการตรวจจับและป้องกันการโจมตี

ประเภทการโจมตี	จำนวนที่ตรวจจับได้ถูกต้อง	จำนวนทั้งหมด	อัตราความถูกต้อง (%)
SQL Injection	1,950	2,000	97.50
XSS	1,890	2,000	94.50
RFI	1,970	2,000	98.50
CSRF	1,860	2,000	93.00
ปกติ (Normal Traffic)	1,980	2,000	99.00
รวมเฉลี่ย			96.10

4. ผลการประเมินการใช้งานของผู้ใช้

การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ทำโดยใช้แบบสอบถาม 5 ระดับ (Likert Scale) กับกลุ่มตัวอย่าง 30 คน ประกอบด้วย

- นักศึกษา จำนวน 15 คน
- อาจารย์ผู้เชี่ยวชาญด้านระบบเครือข่าย จำนวน 10 คน

• เจ้าหน้าที่ IT และผู้ดูแลระบบ จำนวน 5 คน
ผลการวิเคราะห์ค่าความพึงพอใจสรุปได้ดังตารางที่ 3 โดยผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าผู้ใช้มีความพึงพอใจต่อระบบในระดับ “มากที่สุด” โดยเฉพาะด้านความถูกต้องของการตรวจจับ (4.67) และการตอบสนองของระบบ (4.61) ซึ่งยืนยันถึงประสิทธิภาพของระบบ WAF อัจฉริยะที่พัฒนาได้ดี

ตารางที่ 3 ผลการประเมินผู้ใช้งาน

ด้านการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	ระดับความพึงพอใจ
1. ความถูกต้องของการตรวจจับ	4.67	0.45	มากที่สุด
2. ความสะดวกในการใช้งานระบบ	4.55	0.52	มากที่สุด
3. การแสดงผลของแดชบอร์ด	4.42	0.49	มาก
4. ความเสถียรของระบบ	4.38	0.54	มาก
5. การตอบสนองของระบบ	4.61	0.47	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม	4.53	0.49	มากที่สุด

5. สรุปผลการพัฒนาภาพรวม
จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

1.โมเดล Machine Learning ที่เหมาะสมที่สุดคือ DNN (Deep Neural Network) ซึ่งให้

ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าโมเดล Random Forest และ SVM ในทุกตัวชี้วัดระบบสามารถตรวจจับการโจมตีทางเว็บได้ด้วยความแม่นยำเฉลี่ย 96%

2. การตอบสนองของระบบเร็วกว่า WAF แบบ Rule-based เดิมประมาณ 25-30%

3. ผู้ใช้มีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 4.53)

ทั้งนี้ โมเดล Deep Neural Network ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า Random Forest และ SVM เนื่องจากโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึกสามารถเรียนรู้รูปแบบของข้อมูลที่มีความซับซ้อนและมีมิติสูงได้ดีกว่า โดยเฉพาะรูปแบบของพฤติกรรมการณ์โจมตีทางเว็บที่มักมีลักษณะหลากหลายและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา นอกจากนี้ DNN ยังสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงลึกของคุณลักษณะข้อมูล (Feature Representation) ผ่านหลายชั้นของโครงข่าย ทำให้สามารถจำแนกรูปแบบการโจมตีที่ซ่อนอยู่ในข้อมูลได้แม่นยำยิ่งขึ้น ในขณะที่ Random Forest และ SVM อาจมีข้อจำกัดในการเรียนรู้ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ซับซ้อนมาก

จากข้อสังเกตดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าโมเดล DNN มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาเป็นระบบ Web Application Firewall (WAF) อัจฉริยะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับและป้องกันการโจมตีทางไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. สรุป

อภิปรายผลและสรุปผลการวิจัย

การอภิปรายผล (Discussion)

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์การพัฒนาระบบ Web Application Firewall (WAF) อัจฉริยะที่ใช้ Machine Learning ในการตรวจจับและป้องกันการโจมตี ผ่านเว็บแอปพลิเคชัน โดยได้ผลดังนี้

1. ประสิทธิภาพของโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง

การทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง 3 รูปแบบ พบว่า โมเดล Deep Neural Network (DNN) มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยให้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) เฉลี่ย 97.60% และค่า

F1-Score ที่ 96.65% ซึ่งสูงกว่าโมเดล Random Forest และ Support Vector Machine อย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์นี้สนับสนุนสมมติฐานที่ว่า Deep Learning มีความสามารถที่มากกว่าในการวิเคราะห์และจำแนกรูปแบบการจราจรที่ซับซ้อนและผิดปกติ (Anomaly Detection) ชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอน ประกอบด้วยข้อมูลจากชุด CIC-IDS2017 Dataset และ OWASP Benchmark Dataset รวม 250,000 รายการ ซึ่งมีการใช้งานที่เสถียร

2. พัฒนาและการทำงานของระบบ

การพัฒนาโมเดล DNN เข้ากับระบบ WAF ถูกดำเนินการผ่านสถาปัตยกรรมแบบ RESTful API โดยมีองค์ประกอบ Backend พัฒนาด้วย Python (Flask) และ Frontend ด้วย React + Tailwind CSS ผลการทดสอบการตอบสนองของระบบพบว่ามีค่าความหน่วง (Latency) เฉลี่ยเพียง 120 มิลลิวินาทีต่อ Request ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบ WAF อัจฉริยะนี้สามารถดำเนินการตรวจจับแบบเรียลไทม์ได้

การประเมินประสิทธิภาพของระบบโดยรวมพบว่า ระบบสามารถตรวจจับการโจมตีได้อย่างแม่นยำ เฉลี่ย 96.10% โดยเฉพาะอย่างยิ่งการโจมตีประเภท Remote File Inclusion (RFI) (98.50%) และ SQL Injection (97.50%) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการป้องกันภัยคุกคามในระดับแอปพลิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

ผลการประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่าง 30 คน แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้มีความพึงพอใจต่อระบบในระดับ "มากที่สุด" โดยมีค่าเฉลี่ยรวม 4.53 จาก 5 โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้าน ความถูกต้องของการตรวจจับ (ค่าเฉลี่ย 4.67) และ การตอบสนองของระบบ (ค่าเฉลี่ย 4.61) ผลลัพธ์นี้ยืนยันว่าการนำ Machine Learning มาใช้ไม่เพียงแต่เพิ่มความสามารถทางเทคนิคในการตรวจจับ แต่ยังส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพการใช้งานในภาพรวมที่ดีตามการรับรู้ของผู้ดูแลระบบและผู้เชี่ยวชาญด้านความปลอดภัย

สรุปผล

ในการพัฒนาระบบ Web Application Firewall (WAF) อัจฉริยะที่ใช้ Machine Learning ในการตรวจจับและป้องกันการโจมตี ซึ่งผู้วิจัยประยุกต์ใช้ Deep Neural Network (DNN) เป็นกลไกหลักในการวิเคราะห์พฤติกรรมคำร้องขอ (Request) และตรวจจับการโจมตีทางเว็บ

1. โมเดลที่เหมาะสมที่สุด: เป็นโมเดล DNN มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ในการจำแนกประเภทการโจมตี โดยมีความแม่นยำเฉลี่ย 97.60%

2. ประสิทธิภาพของระบบ: ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการตรวจจับการโจมตีทางเว็บด้วยความแม่นยำเฉลี่ยโดยรวม 96.10% และมีเวลาตอบสนองที่รวดเร็ว (Latency 120 มิลลิวินาที)

3. การยอมรับระบบของผู้ใช้งาน: ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมต่อระบบในระดับ "มากที่สุด" (ค่าเฉลี่ย $\bar{X} = 4.53$) สรุปว่า การพัฒนาระบบ Web Application Firewall (WAF) อัจฉริยะที่ใช้ Machine Learning ในการตรวจจับและป้องกันการโจมตีที่พัฒนาขึ้นนี้มีศักยภาพในการเป็นเครื่องมือป้องกันความปลอดภัยทางไซเบอร์ที่มีประสิทธิภาพที่ดี สามารถตรวจจับการโจมตีที่รู้จักและไม่เคยรู้จักมาก่อน

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. การเสริมประสิทธิภาพของโมเดล: ควรมีการสำรวจการใช้เทคนิค Deep Learning ที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น Recurrent Neural Network (RNN) หรือ Transformer เพื่อปรับปรุงความสามารถในการวิเคราะห์เชิงบริบทของ Payload ที่มีความยาวและซับซ้อน

2. การปรับปรุงชุดข้อมูล: ควรมีการรวบรวมชุดข้อมูลที่ครอบคลุมรูปแบบการโจมตีสมัยใหม่และรูปแบบ Zero-Day Attacks ที่หลากหลายยิ่งขึ้น รวมถึงการนำเทคนิค Active Learning มาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการเรียนรู้ของโมเดลอย่างต่อเนื่อง

3. การประยุกต์ใช้งานจริง: ควรมีการทดสอบระบบ Web Application Firewall WAF ในสภาพแวดล้อมการทำงานจริง (Production Environment) เพื่อประเมินความเสถียร (Stability) และความสามารถในการปรับขนาด (Scalability) ภายใต้ปริมาณการจราจรที่สูง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] The Open Web Application Security Project, "OWASP Top 10 - 2021," 2021. [Online]. Available: <https://owasp.org/Top10/>. [Accessed: Mar. 11, 2026].
- [2] M. E. Durmuşkaya and S. Bayraklı, "Web application firewall based on machine learning models," PeerJ Computer Science, vol. 11, Art. no. e2975, 2025, doi: 10.7717/peerj-cs.2975.
- [3] M. Ito and H. Iyatomi, "Web application firewall using character-level convolutional neural network," in Proc. IEEE 14th Int. Colloquium on Signal Processing and Its Applications (CSPA), Kuala Lumpur, Malaysia, Mar. 9-10, 2018, pp. 103-106, doi: 10.1109/CSPA.2018.8368694.
- [4] B. Işık and I. Sogukpinar, "Machine learning based web application firewall," Expert Systems, vol. 42, Art. no. e13467, 2025, doi: 10.1111/exsy.13467.
- [5] G. Betarte, Á. Pardo, and R. Martínez, "Web application attacks detection using machine learning techniques," in Proc. IEEE 17th Int. Conf. Machine Learning and Applications (ICMLA), Orlando, FL, USA, Dec. 16-19, 2018, pp. 1065-1072, doi: 10.1109/ICMLA.2018.00167.

- [6] B. R. Dawadi, B. Adhikari, and D. K. Srivastava, "Deep learning technique-enabled web application firewall for the detection of web attacks," *Sensors*, vol. 23, no. 4, p. 2073, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23042073.
- [7] A. Moradi Vartouni, M. Teshnehlal, and S. Sedighian Kashi, "Leveraging deep neural networks for anomaly-based web application firewall," *IET Information Security*, vol. 13, no. 4, pp. 352-361, Jul. 2019, doi: 10.1049/iet-ifs.2018.5212.
- [8] M. Krishnan, Y. Lim, S. Perumal, and G. Palanisamy, "Detection and defending the XSS attack using novel hybrid stacking ensemble learning-based DNN approach," *Digital Communications and Networks*, vol. 8, no. 1, pp. 49-60, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.dcan.2021.06.004.
- [9] R. Vinayakumar et al., "Deep learning approach for intelligent intrusion detection system," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 41525-41550, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2895334.
- [10] D. S. Berman, A. L. Buczak, J. S. Chavis, and C. L. Corbett, "A survey of deep learning methods for cyber security," *Information*, vol. 10, no. 4, p. 122, Apr. 2019, doi: 10.3390/info10040122.
- [11] D. Chen and D. Zhang, "Deep learning for vulnerability and attack detection on web applications: A systematic literature review," *Sensors*, vol. 22, no. 4, Art. no. 118, Mar. 2022, doi: 10.3390/s22010118.
- [12] A. S. Alnami and T. B. Kim, "Adaptive web application firewall using risk-based adaptation," *Computers & Security*, vol. 101, Art. no. 102120, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.cose.2020.102120.
- [13] I. Sharafaldin, A. H. Lashkari, and A. A. Ghorbani, "Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization," in *Proc. 4th Int. Conf. Information Systems Security and Privacy (ICISSP)*, Funchal, Madeira, Portugal, Jan. 2018, pp. 108-116, doi: 10.5220/0006639801080116.



สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

อาคารสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหม (แจ้งวัฒนะ)
47/433 หมู่ที่ 3 ตำบลบ้านใหม่ อำเภอกปากเกร็ด
จังหวัดนนทบุรี 11120

โทรศัพท์ : 0 2980 6688, โทรสาร : 0 2980 6199

www.dti.or.th



สแกนเพื่อส่งบทความ